

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra aplikované mechaniky

Identifikace mechanických vlastností tištěného materiálu PA11  
a jejich využití pro pevnostní analýzu ortopedické pomůcky

Identification of Mechanical Properties of Printed Material PA11  
and their Use for Strength Analysis of Orthopaedic Aids

Student:

Anna Nezdařilová

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Zdeněk Poruba, Ph.D.

Ostrava 2020

## Zadání bakalářské práce

Student: **Anna Nezdařilová**

Studijní program: B2341 Strojírenství

Studijní obor: 3901R003 Aplikovaná mechanika

Téma: Identifikace mechanických vlastností tištěného materiálu PA11 a jejich využití pro pevnostní analýzu ortopedické pomůcky  
Identification of Mechanical Properties of Printed Material PA11 and their Use for Strength Analysis of Orthopaedic Aids

Jazyk vypracování: čeština

### Zásady pro vypracování:

- Vypracujte rešerši technologií 3D tisku plastů, uveďte možné aplikace jejich využití a zhodnoťte jejich výhody a nevýhody,
- Navrhněte experiment pro identifikaci základních mechanických vlastností zkušebních vzorků z materiálu PA11 vytisknutých technologií 3D tisku (s ohledem na jejich následné využití při numerické analýze ortopedické pomůcky),
- Realizujte a vyhodnoťte navržený experiment a uveďte zjištěné mechanické vlastnosti,
- Na základě dodaného geometrického modelu ortopedické pomůcky a s využitím zjištěných materiálových parametrů proveďte její pevnostní analýzu, diskutujte užití okrajové podmínky a interpretněte dosažené výsledky.

### Seznam doporučené odborné literatury:


- [1] COOK, Robert D. *Finite element modeling for stress analysis*. Vyd. 1. Hong Kong: John Wiley, 1995, 320 s. ISBN 04-711-0774-3.
- [2] ANSYS® *Academic Teaching Advanced, Release R19.2, help system, ANSYS, Inc.*
- [3] STRÍTEŠKÝ, Ondřej, Josef PRŮŠA a Martin BACH. *Základy 3D tisku s Josefem Průšou* [online]. Praha: Prusa Research, 2019 [cit. 2019-12-17]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/wp-content/uploads/zaklady-3d-tisku.pdf>

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Zdeněk Poruba, Ph.D.**

Datum zadání: 20.12.2019

Datum odevzdání: 18.05.2020

  
doc. Ing. Martin Fusek, Ph.D.  
vedoucí katedry



  
prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 18.5.2020

*Nesdavičová*

.....  
Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem si vědoma, že na tuto moji závěrečnou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou bakalářskou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této bakalářské práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- beru na vědomí, že podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů – že tato bakalářská práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 18. května 2020



.....  
Podpis studenta



## **Anotace bakalářské práce**

NEZDAŘILOVÁ, A. Identifikace mechanických vlastností tištěného materiálu PA11 a jejich využití pro pevnostní analýzu ortopedické pomůcky: bakalářská práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra aplikované mechaniky, 2020, 114 s. Vedoucí práce: doc. Ing. Zdeněk Poruba, Ph.D.

Bakalářská práce se zabývá technologií 3D tisku, testováním vzorků vyrobených technologií HP Multi Jet Fusion z materiálu PA11 a následnou pevnostní analýzou ortopedické pomůcky. V úvodu jsou popisovány nejznámější a v současné době nejpožívanější technologie 3D tisku včetně jejich výhod a nevýhod.

Poté je vysvětlen princip tahové zkoušky, která je následně realizována k určení mechanických vlastností materiálu PA11. Zjištěné mechanické vlastnosti jsou použity k pevnostní analýze dodaných modelů ortopedické pomůcky metodou konečných prvků v softwaru ANSYS Workbench 2019. Nakonec je navržena úprava dodaných modelů za účelem snížení napětí.

## **Annotation of bachelor thesis**

NEZDAŘILOVÁ, A. Identification of Mechanical Properties of Printed Material PA11 and their Use for Strength Analysis of Orthopaedic Aids: Bachelor Thesis. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Applied Mechanics, 2020, 114 p. Thesis head: doc. Ing. Zdeněk Poruba, Ph.D.

This bachelor thesis deals with 3D print technology, destructive testing of samples made by HP Multi Jet Fusion technology of material PA11 and strength analysis of the orthopaedic aids. In introduction of thesis is described the most famous and used 3D print technologies, including their advantages and disadvantages.

Then the principle of a tensile test is clarified, which is used for gaining mechanical properties of the material PA11. The mechanical properties are used in the strength analysis of the orthopaedic aids by the finite element method in ANSYS Workbench 2019 R1. Finally, the adjustments of the aids for reducing mechanical stress are propounded.

## Obsah

1	Úvod.....	10
2	Historie 3D tisku.....	11
3	Technologie 3D tisku.....	13
3.1	Rozdělení technologií.....	13
3.2	FDM (Fused Deposition Modeling).....	14
3.2.1	Princip technologie .....	14
3.2.2	Dokončovací operace.....	16
3.2.3	Komponenty FDM tiskárny .....	18
3.2.4	Materiály .....	21
3.2.5	Výhody a nevýhody FDM .....	23
3.3	SLA (Stereolithography).....	24
3.3.1	Princip technologie .....	24
3.3.2	Rozdělení SLA technologie .....	25
3.3.3	Srovnání SLA technologií .....	26
3.3.4	Dokončovací operace.....	27
3.3.5	Komponenty SLA tiskárny .....	28
3.3.6	Materiály .....	30
3.3.7	Výhody a nevýhody .....	31
3.4	SLS (Selective Laser Sintering).....	32
3.4.1	Princip technologie .....	32
3.4.2	Průběh tisku .....	32
3.4.3	Dokončovací operace.....	33
3.4.4	Materiály.....	34
3.4.5	Výhody a nevýhody .....	35
3.5	HP Multi Jet Fusion .....	36
3.5.1	Princip a průběh tisku .....	36
3.5.2	Srovnání technologie Selective Laser Sintering a HP Multi Jet Fusion .....	37
3.5.3	Výhody a nevýhody .....	39
3.6	Přehled dalších technologií .....	40
3.6.1	DMLS (Direct metal laser sintering) .....	40
3.6.2	PolyJet.....	40
3.6.3	LOM (Laminated Object Manufacturing) .....	41
3.6.4	Binder Jetting.....	41
3.7	Výběr technologie 3D tisku .....	43

4	Proces 3D tisku .....	44
4.1	Získání 3D modelu .....	44
4.2	Příprava modelu pro tisk .....	45
4.3	Spuštění tisku .....	45
5	Analýza mechanických vlastností .....	46
5.1	Mechanické vlastnosti polymerů .....	46
5.2	Tahová zkouška .....	46
5.2.1	Princip tahové zkoušky .....	46
5.2.2	Průběh tahové zkoušky .....	47
5.3	Parametry získané z tahové zkoušky .....	49
5.3.1	Mez kluzu $R_e$ .....	49
5.3.2	Mez pevnosti $R_m$ .....	49
5.3.3	Kontrakce $Z$ .....	49
5.3.4	Poměrné prodloužení – Tažnost $A$ .....	50
5.3.5	Modul pružnosti $E$ .....	50
6	Analýza mechanických vlastností materiálu PA11 .....	51
6.1	Materiál PA11 .....	51
6.2	Vzorky pro zkoušení .....	52
6.2.1	Rozměry vzorků .....	52
6.2.2	Poloha při tisku .....	52
6.3	Průběh tahové zkoušky .....	53
6.4	Zpracování naměřených dat .....	56
6.4.1	Zpracování naměřených dat pro vzorek A1 .....	57
6.4.2	Výsledné materiálové parametry pro zkušební vzorky .....	60
6.4.3	Smluvní a skutečné diagramy vzorků A, B, C .....	61
6.5	Hodnocení struktury lomové plochy .....	65
7	Pevnostní analýza ortopedické pomůcky .....	67
7.1	Ortopedická pomůcka Piro .....	67
7.2	Materiálové vlastnosti .....	68
7.3	Úprava dodaného geometrického modelu .....	69
7.3.1	Základní model .....	69
7.3.2	Model s vrubem .....	71
7.4	Vytvoření konečnoprvkové sítě .....	72
7.4.1	Základní model .....	72
7.4.2	Model s vrubem .....	74

7.5	Okrajové podmínky.....	75
7.5.1	Základní model .....	75
7.5.2	Model s vrubem .....	77
7.6	Nastavení výpočtu.....	78
8	Výsledky pevnostní analýzy .....	79
8.1	Základní model.....	79
8.1.1	Redukované napětí.....	79
8.1.2	Posunutí při zatížení silou.....	80
8.1.3	Posunutí při odlehčení .....	81
8.1.4	Plastická deformace .....	82
8.2	Model s vrubem.....	83
8.2.1	Redukované napětí.....	83
8.2.2	Posunutí při zatížení silou.....	84
8.2.3	Posunutí po odlehčení .....	85
8.2.4	Plastická deformace .....	86
9	Optimalizace modelů a pevnostní kontrola .....	87
9.1	Úprava geometrie modelů .....	87
9.1.1	Úprava modelu s vrubem.....	87
9.1.2	Úprava modelu bez vrubu.....	88
9.2	Vytvoření konečnoprvkové sítě .....	89
9.2.1	Optimalizovaný model s vrubem.....	89
9.2.2	Optimalizovaný základní model .....	90
9.3	Okrajové podmínky.....	91
9.3.1	Optimalizovaný model s vrubem.....	91
9.3.2	Optimalizovaný základní model .....	92
10	Výsledky pevnostní analýzy optimalizovaných modelů .....	93
10.1	Optimalizovaný model s vrubem.....	93
10.1.1	Redukované napětí.....	93
10.1.2	Posunutí při zatížení silou.....	94
10.1.3	Posunutí při odlehčení .....	95
10.1.4	Plastická deformace .....	96
10.2	Optimalizovaný základní model.....	97
10.2.1	Redukované napětí.....	97
10.2.2	Posunutí při zatížení silou.....	98
10.2.3	Posunutí po odlehčení .....	99
10.2.4	Plastická deformace .....	100

11	Vyhodnocení optimalizace tvaru .....	101
11.1	Model s vrubem .....	101
11.1.1	Redukované napětí .....	101
11.1.2	Plastická deformace .....	102
11.2	Základní model .....	103
11.2.1	Redukované napětí .....	103
11.2.2	Plastická deformace .....	104
12	Přehled výsledků pevnostní analýzy .....	105
12.1	Základní přehled výsledků .....	105
12.2	Zhodnocení výsledků .....	105
13	Závěr .....	106
14	Seznam použité literatury .....	109

# 1 Úvod

Jen málo nových technologií si v poslední době získalo takovou oblibu jako 3D tisk. Jedná se o automatizovaný proces výroby trojrozměrného objektu z počítačového 3D modelu, obvykle postupným přidáváním materiálu vrstvu po vrstvě. Díky tomuto principu technologie 3D tisku umožňuje výrobu tvarově složitých součástí, které jsou konvenčními technologiemi často nevyrobitelné nebo vyrobitelné velmi složitě. Tato technologie je vhodná zejména pro kusovou a malosériovou výrobu.

3D tisk má v dnešní době široké uplatnění v mnoha odvětvích, zjednodušuje a urychluje návrh designu, výrobu prototypů i funkčních výrobků. Jednou z mnoha oblastí, kde dochází k rozvoji využití 3D tisku je zdravotnictví. Tato technologie spolu s využitím například 3D skenování umožňuje snadnější a rychlejší tvorbu návrhu a výrobu zdravotnických pomůcek podle potřeb a požadavků zákazníků, zejména ergonomických pomůcek, kde je každý jednotlivý kus vyráběn pro konkrétního pacienta. Mezi příklady pomůcek vyráběných 3D tiskem patří ortézy, ortopedické vložky, naslouchadla nebo zubní náhrady.

První část této práce se zabývá přehledem nejpoužívanějších technologií 3D tisku, včetně popisu procesu tisku, výhod a nevýhod dané technologie a materiálů, které daná technologie využívá.

Od počátku používání technologie 3D tisku je nabídka materiálů neustále rozšiřována. Aby bylo možné navrhnout produkt, který je vyroben technologií 3D tisku, je potřeba zjistit mechanické vlastnosti daného materiálu. Tyto vlastnosti závisí na zvolené technologii, tiskárně i nastavení výrobních parametrů.

Druhá část práce se věnuje zjištění mechanických vlastností materiálu PA11 na vzorcích vytištěných technologií HP Multi Jet Fusion. Ke zjištění vlastností vzorků je použita tahová zkouška, která je v bakalářské práci také popsána.

V třetí části jsou zjištěné mechanické vlastnosti využity k pevnostní analýze dodaných modelů ortopedické pomůcky Piro od firmy Invent Medical a následně jsou modely upraveny z důvodu snížení napětí v exponovaném místě. Pevnostní analýza je provedena metodou konečných prvků na základě realizovaného experimentu, který je finančně i časově náročnější.

## 2 Historie 3D tisku

Historie 3D tisku začala v roce 1981 v Japonsku patentem Dr. Hideo Kodamy pro zařízení pro rychlé prototypování. Dr. Kodama je první osobou, která kdy požádala o patent, ve kterém je popsán systém vytvrzování pryskyřice laserovým paprskem. Bohužel patent neprošel z důvodu neúplné specifikace. Další zmínka pochází z Francie, kde s myšlenkou o zařízení pro rychlé prototypování pracující na principu monomeru, který je možné vytvrdit pomocí laseru, přichází Jean-Claude André, Olivier de Witte a Alain le Méhauté. Bohužel ani v tomto případě nebyl patent schválen. V době svého vzniku byl primárně používán název technologie Rapid Prototyping. Důvod pro toto pojmenování je zejména to, že tato technologie byla původně koncipována jako rychlá a finančně výhodná metoda pro vytváření prototypů pro vývoj v průmyslu.

V roce 1986 Charles Hull získal patent na 3D tisk pomocí technologie zvané stereolitografie, označované jako SLA, která funguje na principu vytvrzování tekuté fotopolymerické pryskyřice ultrafialovým laserovým paprskem. Ve stejném roce Charles Hull založil společnost 3D Systems a o 2 roky později vydal první komerční produkt SLA - 1. Dnes je 3D Systems jednou z největších 3D tiskových společností. [1] [2]

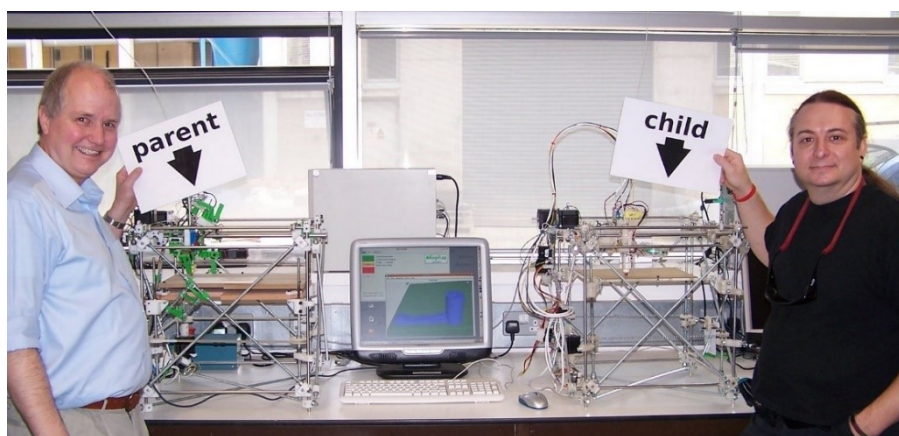


Obrázek 2.1 – Tiskárna SLA - 1 [3]

Technologie SLA nebyla jedinou vyvíjenou technologií. V roce 1988, téhož roku, kdy byl představen SLA - 1, byla vynalezena další průlomová technologie 3D tisku. Tentokrát šlo o selektivní laserové slinování, zkráceně SLS, jehož patent podal Carl Deckard. V roce 1992 byl vydán patent na technologii modelování depozicí taveniny neboli FDM (Fused Deposition Modeling). V průběhu dalších let bylo vynalezeno ještě několik technologií, např. technologie Binder Jetting.

V průběhu devadesátých let a začátkem dvacátého století stále docházelo k vývoji a zdokonalování řady pokročilých technologií, které se zaměřovaly na průmyslové použití, a přestože se stále jednalo zejména o použití na výrobu prototypů, docházelo také k vývoji technologií se zaměřením na výrobu specifických výrobků, například ve slévárenství k výrobě modelu použitého k výrobě formy nebo k výrobě formy samotné. [1] [2]

V roce 2005 dochází k významnému milníku v novodobé historii 3D tisku. V této době vypršely klíčové patenty k tiskové technologii FDM. Na University of Bath ve Velké Británii založil doktor Adrian Bowyer významný projekt, s cílem vytvořit tiskárnu se schopností vyprodukovat co nejvíce součástí k sestavení sebe sama a ke stavbě dalších zařízení. Bowyer dále zveřejnil návrhy dílů pro svou 3D tiskárnu na internetu a povzbudil ostatní, aby je vylepšili a následně zveřejnili své verze. Tento koncept nazval projekt RepRap. Jedná se o open-source projekt (zdrojový kód je přístupný veřejnosti), k jehož vývoji a zdokonalování přispívá komunita nadšenců po celém světě. Bowyer nazval svou první tiskárnu Darwin. Soubory pro výrobu plastových dílů byly zveřejněny online, volně dostupné, s podporou změn a vylepšení. Potřebné kovové součásti jsou lehce dostupné veřejnosti. [1] [2] [4]



Obrázek 2.2 – Zakladatel RepRap projektu Adrian Bowyer (vlevo) [4]

V roce 2012 byla založena česká firma Prusa Research vyrábějící 3D tiskárny. Jejím zakladatelem je Josef Průša, český vynálezce, investor a vývojář projektu RepRap. Všechny tiskárny vyráběné touto společností jsou také open-source. Během několika let se stal jedním z předních výrobců a inovátorů 3D tiskáren. Firma Prusa Research nabízí zejména FDM tiskárny, například nejznámější model Original Prusa i3 MK3S, dále tiskárnu založenou na technologii SLA – tiskárnu Original Prusa SL1 a nově také vlastní filament k FDM tiskárnám – Prusament. [4]



### 3 Technologie 3D tisku

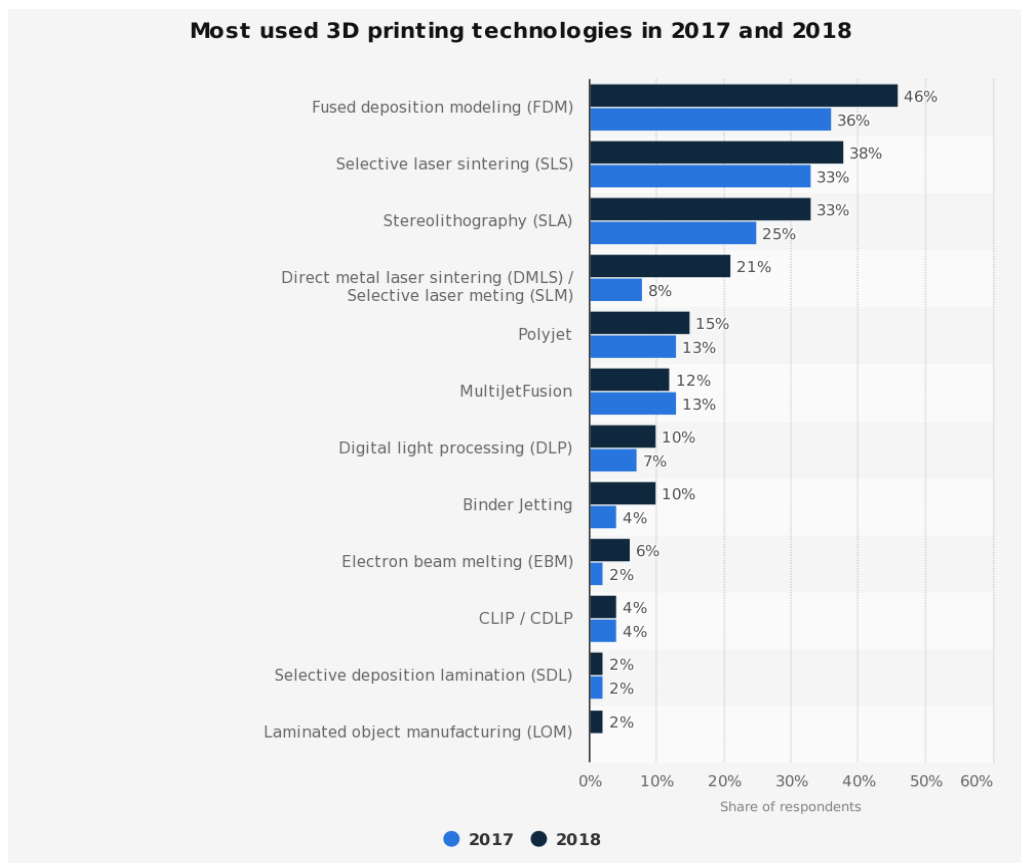
#### 3.1 Rozdělení technologií

Pojem 3D tisk pokrývá celou řadu procesů, které nabízejí širokou škálu možností pro výrobu produktů z různých materiálů. V podstatě to, co mají všechny procesy společné, je způsob, jakým se výroba provádí – jedná se o aditivní proces výroby v tenkých vrstvách.

Nejznámější a nejpoužívanější technologie 3D tisku je možné rozdělit do 3 základních kategorií

1. Materiál je nanášen tiskovou hlavou na tiskovou podložku ve vrstvách. Tisková hlava je vždy po dokončení dané vrstvy posunuta o výšku jedné vrstvy nahoru a pokračuje v tisku vrstvy nové. Typickým příkladem je technologie FDM (Fused Deposition Modeling).
2. Tekutý materiál umístěný v nádobě s tiskovou deskou je vytvrzován v rámci vrstvy na požadovaných místech. Příkladem je technologie SLA (Stereolitografie). Materiál je vytvrzován světelným paprskem.
3. Materiál v podobě jemného prášku je rozprostřen na tiskové podložce a následně spékán laserem. Po spečení vrstvy je tisková podložka posunuta o definovanou výšku vrstvy. Představitelem tohoto principu je technologie SLS (Selective Laser Sintering). [4] [5]

Na obrázku 3.1 můžeme vidět míru využití jednotlivých technologií v roce 2017 a 2018.

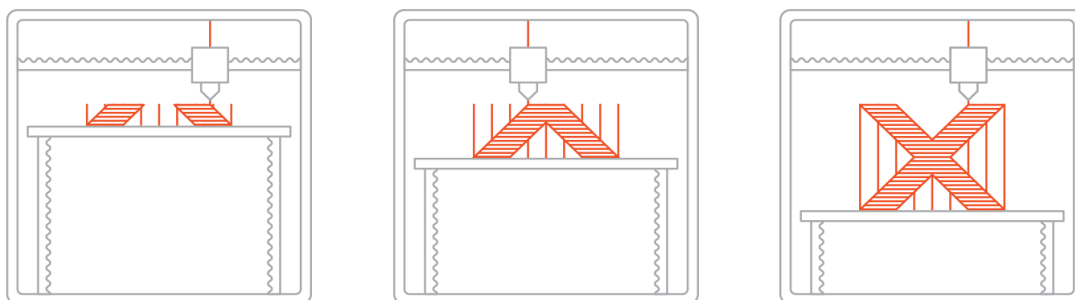


Obrázek 3.1 – Míra využití technologií 3D tisku v roce 2017 a 2018 [6]

## 3.2 FDM (Fused Deposition Modeling)

### 3.2.1 Princip technologie

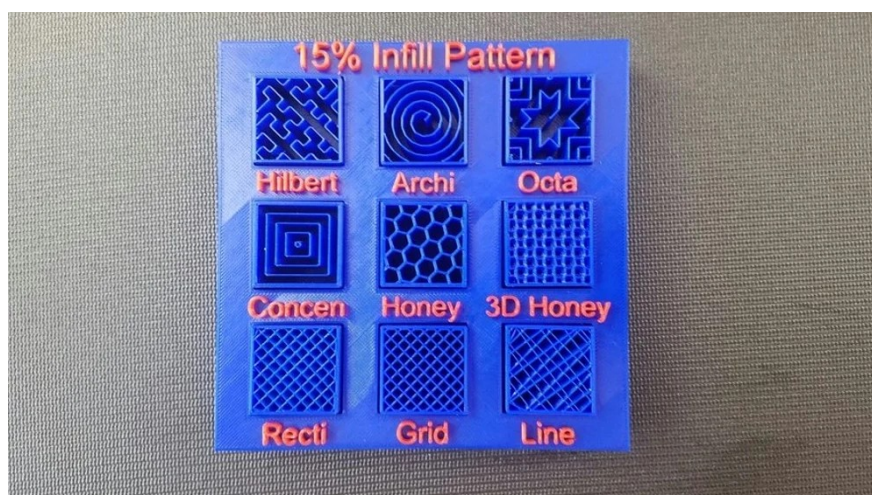
Jedná se o nejrozšířenější a nejdostupnější technologii 3D tisku. Funguje na principu vytlačení roztaveného polymeru navinutého na cívce ve formě tiskové struny, nazývané filament, přes jednu nebo více vyhřívaných trysek. Trysky jsou připojeny na tiskovou hlavu (extruder), kde se filament taví. [2] [7]



Obrázek 3.2 – Princip metody FDM [7]

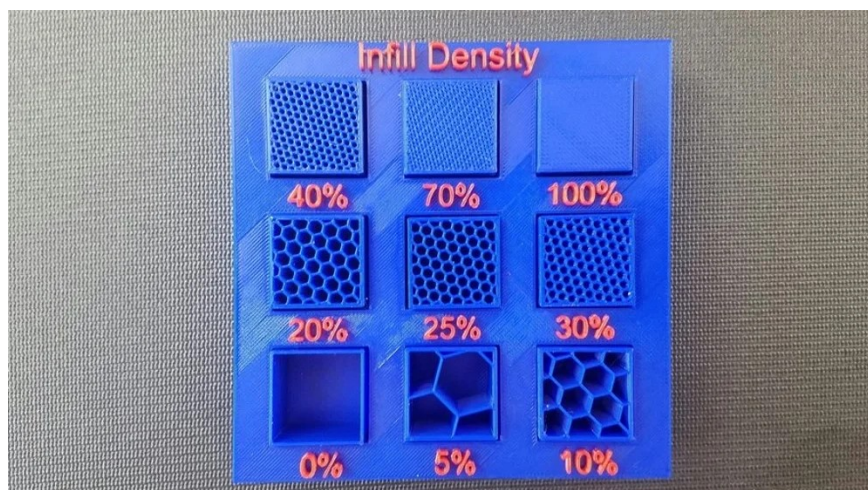
Tisková hlava je připojena k tříosému systému, který jí umožňuje pohyb ve směru tří, navzájem kolmých, souřadnicových os x, y a z. Roztavený materiál je extrudován v tenkých pramenech a nanášen vrstvu po vrstvě na předem určená místa, kde je ochlazen a ztuhne. Někdy je ochlazování materiálu urychlováno použitím chladicích ventilátorů připevněných k tiskové hlavě. [7]

Na začátku procesu tisku je vyroben obrys každé vrstvy, který je poté vyplněn roztaveným filamentem. Způsob vyplnění vytvořeného obrysu je možné volit z nabídky vyplňujících vzorů (Infill Pattern), který je vybrán podle požadované vnitřní struktury, například podle požadované hmotnosti výrobku, polohy těžiště nebo pevnosti. Výplň dále umožňuje tiskárnám spolehlivě a efektivně tisknout vodorovné okraje přes prázdné místo. Vyplňující vzory jsou vybrány zejména podle tvaru (viz obrázek 3.3) a hustoty (viz obrázek 3.4). [1] [8]



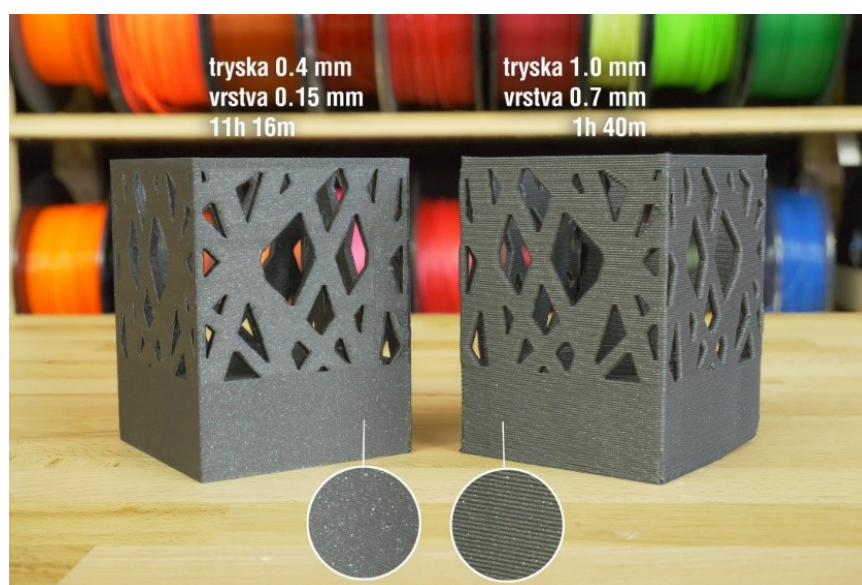
Obrázek 3.3 – Příklady možností vyplňujících vzorů [9]

Po rozhodnutí o použití konkrétního tvaru výplně přichází na řadu hustota výplně (Infill Density), měřena v procentech. Pro duté tisky je použita hustota 0 %. Běžná hustota výplně se pohybuje mezi 20 % a 25 %. Ta nabízí přijatelnou rovnováhu mezi pevností a spotřebou materiálu. Pro malé a mechanicky namáhané tisky bývá obvykle použita hustota v rozmezí 90–100 %. [9]



Obrázek 3.4 – Příklady hustoty výplně [9]

Po dokončení vrstvy je tisková hlava posunuta nahoru a dochází k vytvoření další vrstvy. Typická výška vrstvy použitá v technologii FDM se pohybuje mezi 0,05 a 0,4 milimetry. Použití menší výšky vrstvy vede k hladšímu povrchu a přesnějšímu zachycení zakřivené geometrie, zatímco použití větší výšky vede k rychlejšímu tisku a nižším nákladům. Výška vrstvy by neměla přesahovat 80 % průměru trysky. Na obrázku 3.5 můžeme vidět, jak velikost trysky a výška vrstvy ovlivňuje strukturu povrchu a čas tisku. [7]



Obrázek 3.5 – Vliv velikosti trysky a výšky vrstvy na kvalitu povrchu a čas tisku [10]

### 3.2.2 Dokončovací operace

#### Odstranění podpůrného materiálu

Mezi základní úkony zpracování výsledného výrobku patří odstranění podpůrného materiálu, který slouží k vytvoření tvarově složitých součástí během tisku, zejména součástí, které obsahují převisy větší než 45 stupňů vůči vodorovné rovině. Ačkoli je doporučováno se podpěrám vyhnout, ne vždy je to možné. Podpory jsou obvykle tisknuty ze stejného materiálu jako samotný výrobek a poté odlamovány. Z důvodu bezproblémového odlomení je potřebné ponechat distanční vzdálenost mezi výrobkem a podpěrami. [4]



Obrázek 3.6 – Ručně odstranitelný materiál podpor (bílý filament) [11]

V případě použití tiskárny s možností tisku 2 a více materiálů najednou lze využít některý ze škály rozpustitelných materiálů. V tomto případě neplatí pravidlo pro zanechání distanční vzdálenost mezi výrobkem a podpěrami z důvodu pozdějšího rozpuštění podpor. Použití rozpustitelných podpůrných materiálů je finančně náročnější než použití běžných filamentů. Množství použitého rozpustného materiálu lze snížit vytisknutím pouze několika distančních vrstev mezi podpěrami z klasického filamentu a výrobkem. Ve srovnání s ručním odstraněním podpěr je menší pravděpodobnost poškození součástí. [4]

#### Lepení

V některých případech je vhodnější vytisknout výrobek na více částí a poté dané části slepit. Jedním z příkladů je vytištění koule, jelikož při tisku jako jeden kus má koule pouze malou styčnou plochu s podložkou. Například k lepení materiálu ABS je možno využít rozpustitelnost v acetonu. Ke slepení postačí potřetí obou ploch acetonem a přiložení k sobě.



Obrázek 3.7 – Ukázka možnosti tisku koule technologií FDM [4]



## Vyhlazování

Objekty vytištěné technologií FDM mají v porovnání s následujícími technologiemi 3D tisku velkou tloušťku jednotlivých vrstev, které jsou pro lidské oko viditelné, a v případě zaoblených tvarů s více než jednou vrstvou je patrný schodovitý tvar obrysu výrobku. V případě vyhlazení obrysu výrobku je možno použít více řešení. [8]

Jedno z možných řešení je použití brusného papíru. Při této metodě je potřeba postupovat velmi opatrně, jelikož prudkými pohyby brusného papíru po povrchu může dojít k roztavení plastového materiálu. Další možností je využití rozpustitelnosti materiálu. Jako příklad lze znovu použít rozpustitelnost materiálu ABS v acetonu. Zde je možnost ponoření výrobku na 5 až 10 sekund do acetonu, nebo uzavření výtisku do nádoby s acetonem na dně, kde acetonové páry model pomalu vyhladí. [4]



Obrázek 3.8 – Vyhlazení výtisku pomocí par acetonu [4]

## Barvení

Před barvením výrobku je doporučováno povrch zbrousit, čímž se odstraní linie jednotlivých vrstev. Poté je nanесena základní vrstva, která připravuje povrch na nanесení požadované barvy. Jakmile povrch zaschne, výrobek je připraven na nástřík nebo nátěr barvy. [12]



Obrázek 3.9 – Barvení výrobku [13]

### 3.2.3 Komponenty FDM tiskárny

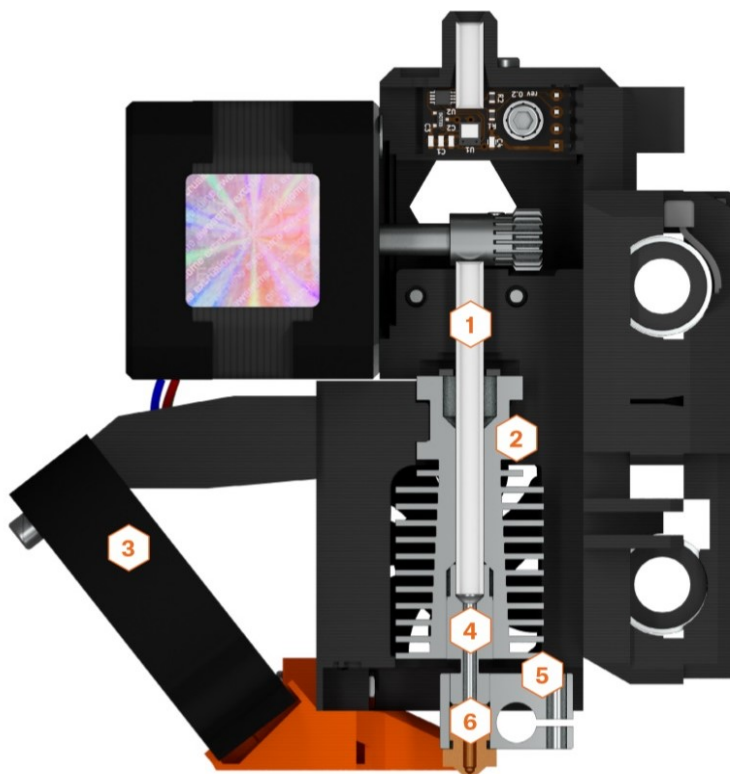
#### Extruder

Extruder (tisková hlava) je část 3D tiskárny, do které vstupuje filament v pevném stavu a na konci je roztavený vytlačován přes trysku ven, čímž dochází k nanášení jednotlivých tiskových vrstev. Extruder je složen z 6 základních částí: teflonové trubičky, heatsinku, tiskového ventilátoru, heat breaku, heater blocku a trysky (viz obrázek 3.10).

Na začátku do extruderu vstupuje filament v pevném stavu přes teflonovou trubičku. Následně prochází skrz heat sink (chladič), který odvádí teplo šířící se z heat breaku, aby byla oblast mezi filamentem v pevném a roztaveném stavu co nejmenší. Z důvodu zvýšení účinnosti může být na heat sinku připevněn ventilátor. V heater blocku je umístěno topné těleso a termistor. Termistor poskytuje zpětnou vazbu o aktuální teplotě. V této úrovni je již filament roztaven a vytlačován přes trysku ven. [4]

#### Schéma extrudéru [4]

1. Teflonová (PTFE) trubička
2. Heatsink (chladič)
3. Tiskový ventilátor
4. Heat break (izolátor)
5. Heater block
6. Tryska

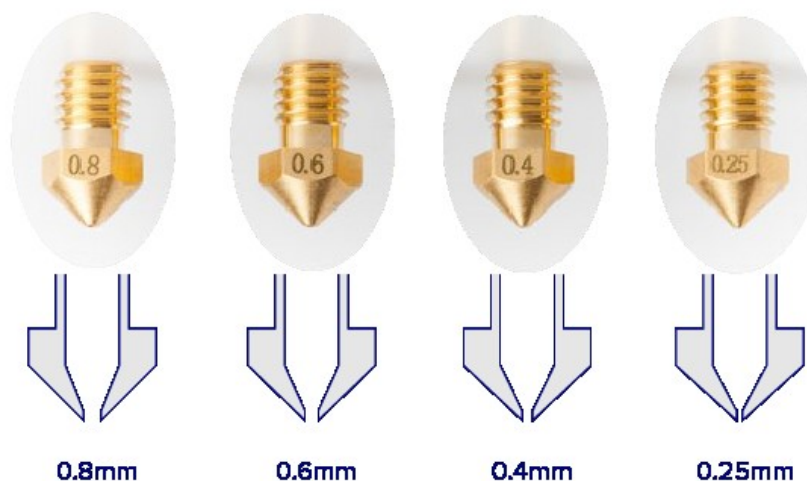


Obrázek 3.10 – Schéma extruderu (tiskové hlavy) [4]

## Tryska

Tryska je jediná část extruderu, která je v praxi nejčastěji měněna. Různými průměry trysky je měněna kvalita a rychlost tisku, proto je velikost trysek opravdu důležitá. Obvykle se pohybuje od 0,25 mm do 0,75 mm. Nejběžnější velikost je 0,5 mm.

Menší průměr trysky zajišťuje vytlačování tenčích linií a menší tloušťku vrstvy, což vede k hladšímu povrchu a lépe vypadajícímu výrobku. Menší průměr umožňuje tisk detailnějších částí. Naopak větší průměr trysky vede ke silnějším liniím, většímu počtu vrstev a kratší době tisku. [4] [14]



Obrázek 3.11 – Průměry trysek [14]

## Rám

Rám musí být velmi tuhý a pevný, aby kvalita tisku byla co nejvyšší. Pevný a masivní rám snižuje vibrace a tím eliminuje možné odchylky při tisku.

## Vyhřívání podložka

Mezi nejdůležitější části moderní FDM 3D tiskárny v dnešní době patří vyhřívání podložka, na kterou je možné tisknout výrobky z různých materiálů. Vyhřívání podložky udržuje plast teplý a tím zabraňuje jeho deformaci vlivem tepelné roztažnosti materiálu. Rovněž zajišťuje vyšší přilnavost mezi vrstvami, což vede k lepší strukturální integritě tištěných částí. Vyhřívání podložky je pro první vrstvu zásadní pro zajištění pevné základní vrstvy. Teplota podložky se obvykle pohybuje podle typu použitého materiálu od 40 °C do 110 °C, proto je potřebné dodržovat bezpečnostní pokyny při tisku. Nevyhřívání podložky mohou pracovat pouze s plasty, které mají menší tendenci se během chlazení deformovat.

## Krokové motory

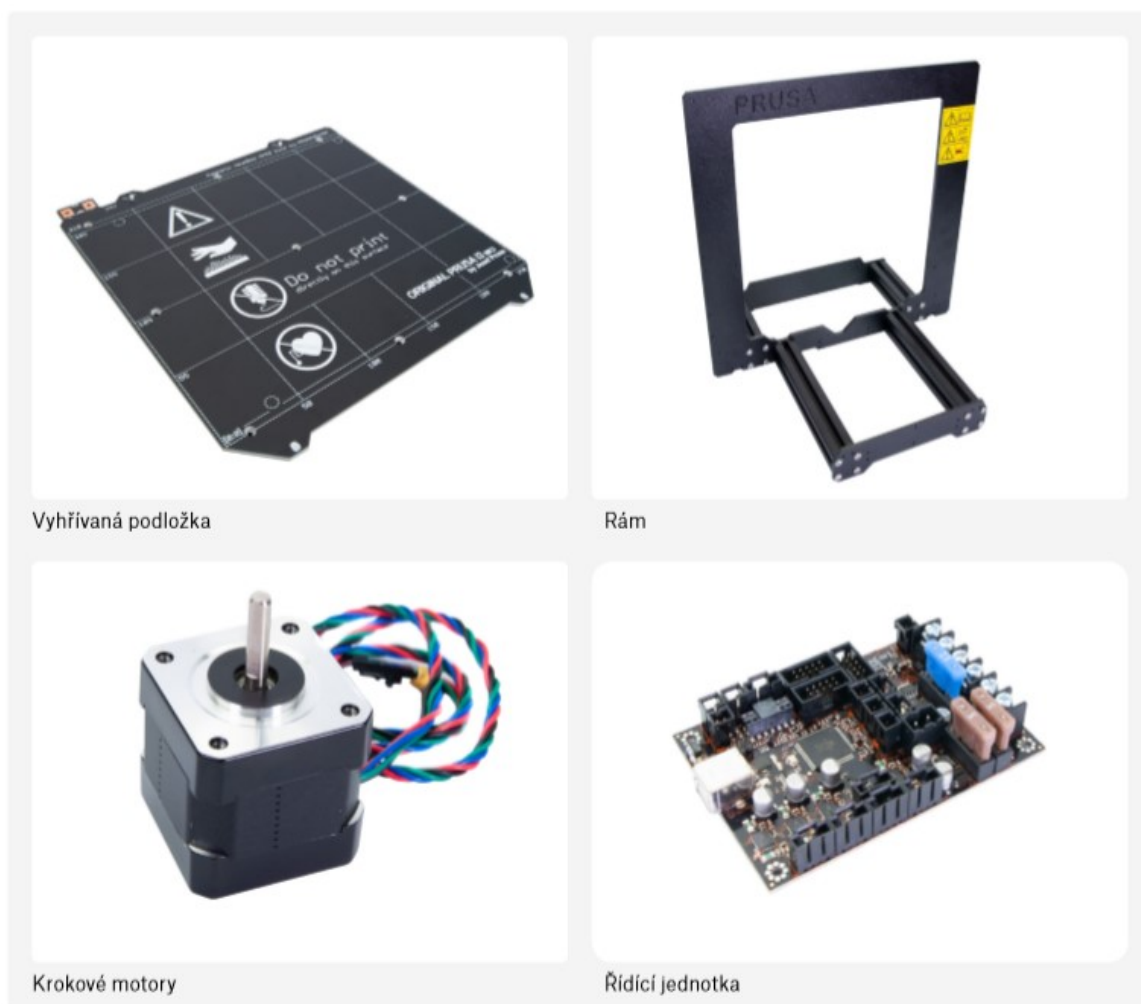
Krokové motory slouží k zajištění pohybu extruderu nebo tiskové podložky v prostoru, další motor slouží k podávání filamentu do extruderu. Motory pro 3D tiskárny mají obvykle 200 kroků za otáčku.

## Řídící jednotka

O chodu celé tiskárny se stará řídící jednotka, která čte a zpracovává vstupní textové soubory (G-code), podle kterého ovládá pohyby krokových motorů a nahřívání podložky a trysky.

## LCD display

Některé 3D tiskárny jsou vybaveny LCD displejem, které umožňují tisk bez nutnosti připojení počítače. K přečtení pokynů z G-codu je vyžadována SD karta. [4] [14]



Obrázek 3.12 – Části FDM tiskárny [4]



### 3.2.4 Materiály

#### PLA

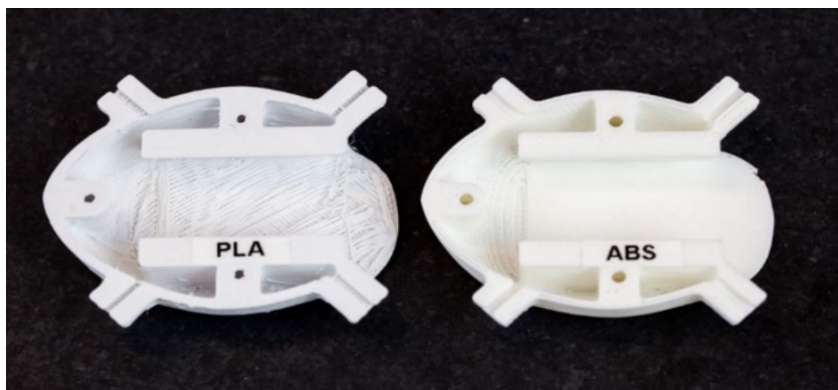
PLA patří mezi nejpoužívanější a nejpobulárnější filament, zejména při domácím použití. Při tisku vzniká hezký povrch výrobku, a to i v místech s převisy, nevzniká nepříjemný a nebezpečný zápach jako u jiných materiálů a nabízí se ve velké barevné škále. S PLA lze docílit kvalitní tisk malých a detailních výrobků. Velkou výhodou tohoto materiálu je malá teplotní roztažnost, tudíž nemá tendenci praskat či odlepovat se z podložky. Patří mezi nejlevnější materiály a jedná se o biologicky rozložitelný plast. Mezi nevýhody patří křehkost materiálu, kdy při mechanickém namáhání nedochází k ohybu, ale k prasknutí výtisku. Další nevýhoda je malá teplotní odolnost, při 60 °C materiál měkne. [4] [15]



Obrázek 3.13 – PLA filament [16]

#### ABS

ABS také patří mezi nejpoužívanější materiály k 3D tisku. Jedná se o tvrdý a odolný termoplast. Při ochlazování má sklon se deformovat a nedoporučuje se tisk bez vyhřívání podložky. ABS patří mezi termoplasty na bázi oleje. Při mechanickém namáhání je schopný se ohnout bez prasknutí. ABS patří mezi první dostupné materiály v historii 3D tisku. Materiál je recyklovatelný, ale ne biologicky odbouratelný. Mezi jeho výhody patří odolnost vůči vysokým i nízkým teplotám a chemická odolnost. Mezi nevýhody patří vylučování nebezpečných výparů při tisku. [4] [15] [17]



Obrázek 3.14 – Srovnání tisku PLA a ABS [18]

## PETG

Materiál PETG se se svou obtížností tisku nachází mezi PLA a ABS a kombinuje jejich vlastnosti. Stejně jako ABS má tendenci se při chladnutí deformovat a nedoporučuje se používat bez vyhřívané podložky a se zvětšujícím se modelem je tisk náročnější. [4] [15]

Tabulka 3.1 Srovnání vlastností materiálu k 3D tisku metodou FDM [10]

	PLA	ABS	PETG
Teplota trysky	180–230 °C	210–250 °C	220–260 °C
Teplota podložky	20–60 °C	80–110 °C	60–90 °C
Přilnutí první vrstvy	Dobré	Drobné problémy	Drobné problémy
Výpary	Skoro žádné	Silné	Silné
Mez pevnosti v tahu [MPa]	110	37–110	53
Tvrdost Rockwell R	–	94	108

## Další používané materiály

Mezi další používané materiály patří například ohebné materiály pod názvem FLEX, které se chovají podobně jako guma nebo kompozitní materiály (bronzefill, copperfill, woodfill), skládající se z hlavní plastové složky a sekundárního materiálu ve formě prachu. [4]

## Podpůrné materiály

Jak již bylo dříve zmíněno, při návrhu modelu a pozdější volbě polohy při tisku je doporučeno používat podpěr co nejméně, což bohužel není vždy možné. Jedna z možností odstranění podpěr je použití rozpustného materiálu, např. filamenty rozpustné ve vodě. [4]

## BVOH

BVOH patří k jednomu z nejznámějších a nedostupnějších vodou rozpustných materiálů. Mezi hlavní vlastnosti patří spolehlivá extruze, rychlá doba tavení a vynikající struktura vrstev. 3D tisk materiálu BVOH je optimalizován k použití s materiály ABS, PLA a PETG. [19]

### 3.2.5 Výhody a nevýhody FDM

Výhody [4] [20]

- Finančně nejvýhodnější technologie výroby vlastních výrobků z termoplastů, nízká pořizovací cena tiskárny i materiálů
- K dispozici je široká škála termoplastických materiálů
- V současnosti nejjednodušší technologie 3D tisku

Nevýhody [4] [20]

- Dlouhý čas tisku
- Velká nepřesnost tisku ve srovnání s dalšími technologiemi (SLS, SLA), tudíž není vhodná k tisku detailních výrobků
- Výrobky vytištěné technologií FDM mají ve většině případů viditelné přechody mezi jednotlivými vrstvami, pro hladký povrch je potřebné provést dokončovací operace
- Při vytváření návrhu musí být kladen důraz na to, aby model nebyl tištěný mimo podložku nebo už vytisknutou vrstvu, nelze tisknout tzv. do vzduchu
- Výrobky jsou vzhledem k rozdílům mezi vrstvami vytvořenými procesem tisku anizotropní

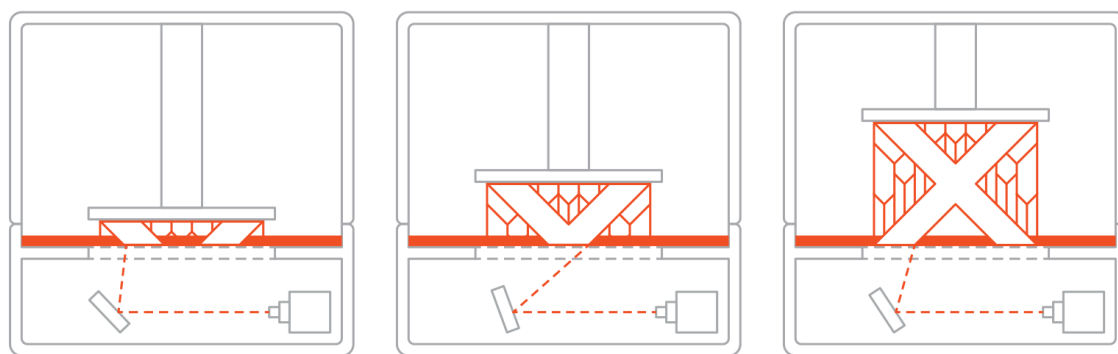
### 3.3 SLA (Stereolithography)

#### 3.3.1 Princip technologie

SLA neboli stereolitografie je první patentovaná technologie 3D tisku na světě, fungující na principu vytvrzování tekuté pryskyřice citlivé na UV světlo. Slovo stereolitografie pochází z řeckých slov stereo, což znamená pevná, a (foto) litografie, což je forma psaní se světlem, což přesně vystihuje princip této metody. Ve srovnání s technologií FDM je tisk detailnější.

Technologie stereolitografie využívá nádobu s tekutou fotocitlivou pryskyřicí. Tisková plocha je umístěna v této nádobě. Při procesu tisku dochází k přechodu ultrafialového světla přes povrch pryskyřice a k selektivnímu vytvrzení materiálu.

Ke vytvrzení materiálu dochází ve vrstvách. Po vytvrzení dané vrstvy následuje posunutí tiskové plochy ve vertikálním směru o tloušťku další vrstvy, obvykle o 0,05 až 0,15 mm, nanesení další vrstvy pryskyřice a vytvrzení. Proces se opakuje, dokud není výrobek dokončen. [4] [21] [22].



Obrázek 3.15 – Princip technologie SLA [22]

Při tisku tvarově složitějších modelů je nutné budovat dočasné podpory, které se po dokončení tisku výrobku ručně odlamují. Materiál podpor je stejný jako materiál výrobku. Orientace výrobku při tisku určuje umístění a výšku podpor. Je doporučováno, aby vizuálně důležité části nepřišly do kontaktu s podporami. Poloha výrobku, a tedy i konstrukce podpor jsou závislé na parametrech SLA tiskárny. [22]

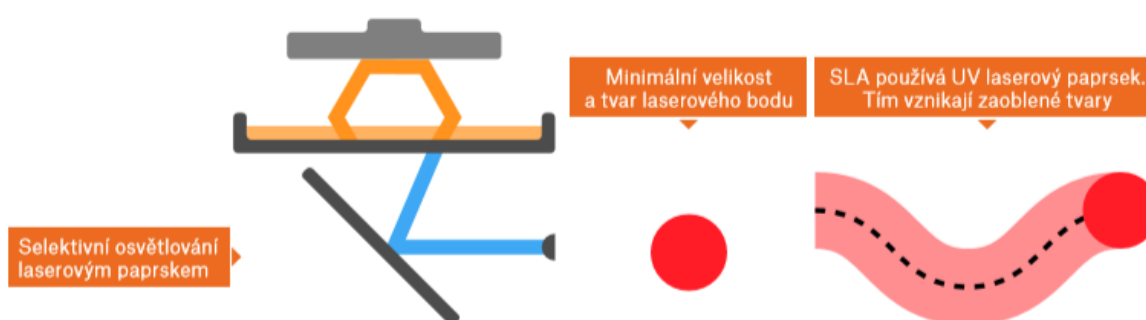
Po vytištění ještě není výrobek vhodný k okamžitému použití z důvodu znečištění nevytvrzené pryskyřice na povrchu a musí dojít k vytvrzení výtisku UV světlem. [4] [23]

### 3.3.2 Rozdělení SLA technologie

Podle způsobu osvitů a vytvrzení pryskyřice lze rozlišit tři hlavní kategorie SLA tisku. Zvolená kategorie ovlivňuje kvalitu a dobu tisku. Pochopení jednotlivých rozdílů mezi hlavními třemi kategoriemi umožňuje odhadnutí výsledné kvality tisku.

#### SLA – Laser

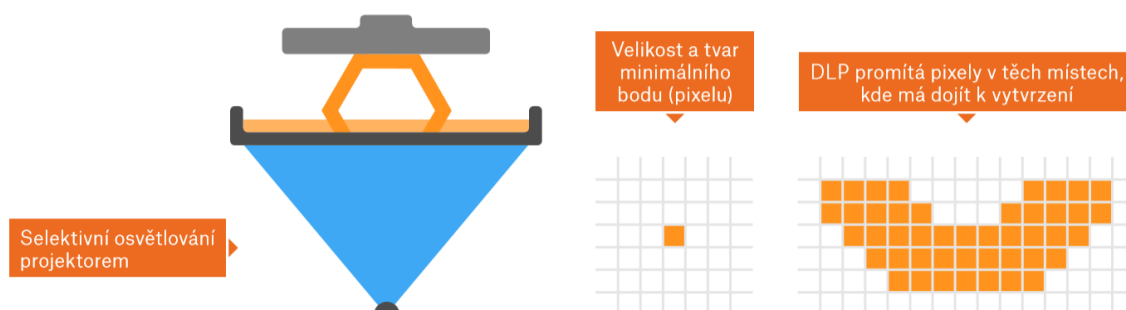
V tomto případě dochází ke směřování a osvitů UV laserového paprsku pomocí dvou zrcadel a postupnému vykreslování tiskové vrstvy. Zrcadla jsou řízena dvěma motory, jeden v ose X a druhý v ose Y, aby rychle zaměřila tiskovou oblast. Doba tisku lze ovlivnit plochou, která je v dané vrstvě vytvrzována. Laserový SLA tisk byl původním prostředkem stereolitografie, který vyvinul v roce 1986 Charles Hull, zakladatel 3D Systému. [4] [21]



Obrázek 3.16 – Princip SLA – Laser technologie [4]

#### DLP (Digital Light Processing)

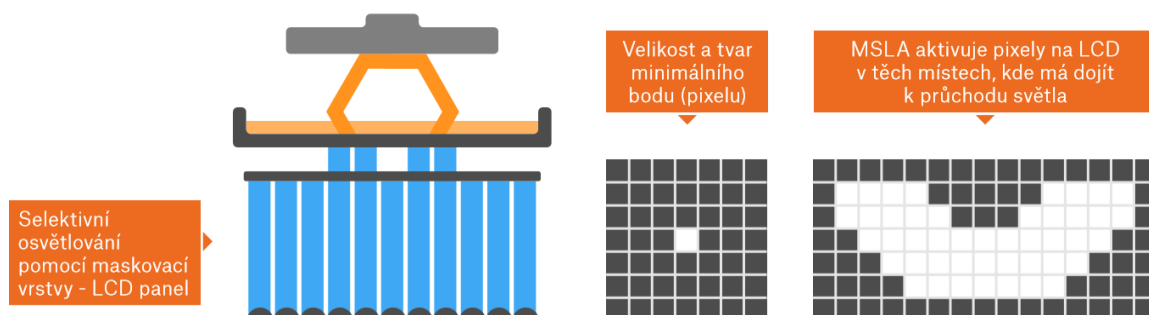
Zde dochází k osvitů celé tiskové vrstvy v jeden okamžik digitálním projektořem, kde v místech osvětlení projektořem dochází k vytvrzení pryskyřice. Výhodou oproti laserové technologii SLA je nezávislost času vytvrzení jedné vrstvy na ploše vrstvy a počtu tištěných objektů v jedné vrstvě. Tiskový čas jedné vrstvy je tedy fixní. Protože obraz každé vrstvy je osvětlen digitálně, skládá se z mnoha čtvercových pixelů, což vede k vytvoření vrstvy tvořené malými krychlemi nazývané voxely. [4] [24]



Obrázek 3.17 – Princip technologie DLP – SLA [4]

## MSLA (Mask Stereolithography)

Při použití technologie MSLA dochází k osvětlení pomocí UV LED a maskování celé tiskové vrstvy pomocí LCD displeje. K vytvrzení pryskyřice dochází jen v místech, kde jsou pixely aktivovány a kde tedy prostoupí UV světlo. I tato technologie je díky vytvrzování celé vrstvy najednou nezávislá na ploše vrstvy a na počtu tištěných objektů. [4] [24]



Obrázek 3.18 – Princip technologie MSLA [4]

### 3.3.3 Srovnání SLA technologií

Jelikož u technologií DLP a MSLA dochází k osvětlení tiskové plochy v jeden okamžik, mohou tyto technologie dosáhnout výrazně vyšší rychlosti tisku než laserová technologie SLA, zejména u velkých, plných výtisků, kde tisk vyplní většinu tiskové podložky. Také při tisku velmi malých a detailních objektů, kde by laseru trvalo dlouhou dobu, než se pohne všemi souřadnicemi, mohou technologie DLP a MSLA také tisknout rychleji. Rychlost tisku laserovou technologií SLA bývá srovnatelná s tiskárnami FDM, ale nabízí vynikající rozlišení a kvalitu výstupu a širší škálu materiálů ve srovnání s tiskárnami FDM. V případě technologií DLP a MSLA lze pozorovat efekt svislých linií voxelů. Na fotografii níže lze vidět tyto linie voxelů na povrchu, vlevo model vytištěný laserovou technologií SLA, vpravo technologií DLP a MSLA. [24] [25]



Obrázek 3.19 – Srovnání kvality povrchu technologií SLA – Laser, DLP a MSLA [24]

### 3.3.4 Dokončovací operace

K dosažení optimálních vlastností výtisků je nutné následné zpracování. Při tisku technologií SLA je velmi důležité dbát na bezpečnost při manipulaci s vytisknutým modelem, tedy používat rukavice, brýle a ochranný oděv. Po dokončení tisku je potřebné nevytvrzený a na povrchu znečištěný výrobek s nevytvrzenou pryskyřicí vyjmout pomocí ostrého nástroje. Je nutné vyjmout výrobek velmi opatrně.

#### Čištění modelu

Nevytvrzený výrobek má na povrchu velké množství nevytvrzené pryskyřice a je na povrchu lepkavý, tudíž je nutné očištění modelu. Výrobek se doporučuje namáčet izopropylalkoholu, aby se zbytek pryskyřice smyl. K lepšímu a rychlejšímu výsledku je možné použít ultrazvukové čističky.

#### Vytvrzení modelu

K dosažení lepších mechanických vlastností je potřeba vystavit výrobek UV světlu. K tomuto kroku je možné použít vysoce výkonné vytvrzovací komory. Před vložením do vytvrzovací komory je důležité, aby byl výrobek suchý. Vytvrzování mokrých nebo lepkavých výrobků může vést k povrchovým defektům. Na trhu existují přístroje, které se postarají automaticky o umytí a vytvrzení. Mycí a vytvrzovací stanice nabízejí výrobci 3D tiskáren jako samostatné příslušenství. Stanice výrobek umyje, usuší a následně vytvrdí UV světlem.

#### Odstranění podpor

Odstranění podpor se provádí ručně pomocí řezného nástroje.



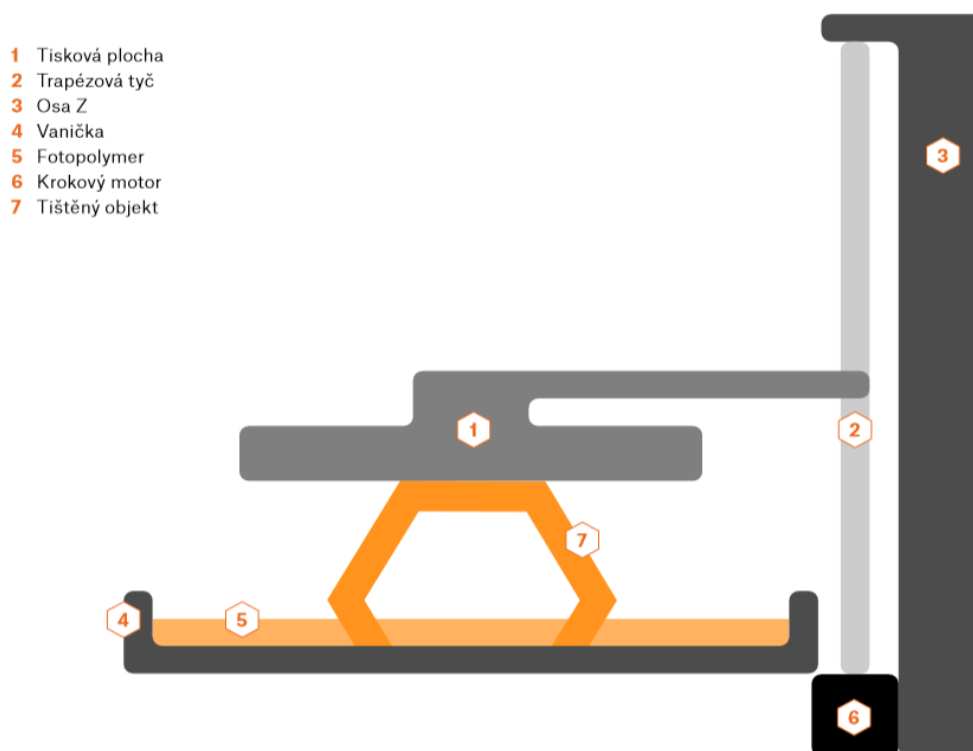
Obrázek 3.20 – Odstranění podpor řezným nástrojem u technologie SLA [22]

#### Další zpracování

Ke zlepšení estetické stránky modelu je možno použít stejné kroky jako u technologie FDM, tedy broušení, leštění, barvení či lakování. [4] [26] [27]

### 3.3.5 Komponenty SLA tiskárny

SLA tiskárny a tím i jejich komponenty se dělí podle způsobu selektivního vytvrzování tiskové vrstvy. Zde je ukázka komponentů pro tiskárnu fungující na principu MSLA. [4]



Obrázek 3.21 – Schéma MSLA tiskárny [4]

#### UV dioda

Tiskárny využívají výkonnou UV diodu zajišťující osvit a vytvrzení pryskyřice během několika vteřin. UV dioda se nalézá uvnitř tiskárny pod LCD panelem.

#### LCD panel

Při osvitu UV diodou u vytvrzovacího procesu dochází k osvětlení celé tiskové plochy, což neumožňuje tisk pouze daných míst, ale došlo by k tisku kvádra v celém tiskovém objemu. LCD panel slouží k maskování, tedy umožňuje osvit jen u jednotlivých pixelů a určuje, kterými pixely světlo projde.

#### Ovládací panel

Ovládací panel je druhý displej v tiskárně, ale tento se nepodílí na samotném procesu tisku. Je umístěn na přední straně tiskárny a slouží k uživatelské obsluze tiskárny.

#### Nádoba s tekutou pryskyřicí

Nádoba slouží jako zdroj tekutého tiskového materiálu. Mezi důležité vlastnosti nádoby patří průhledné dno umožňující průchod UV světla.



## Posun osy Z

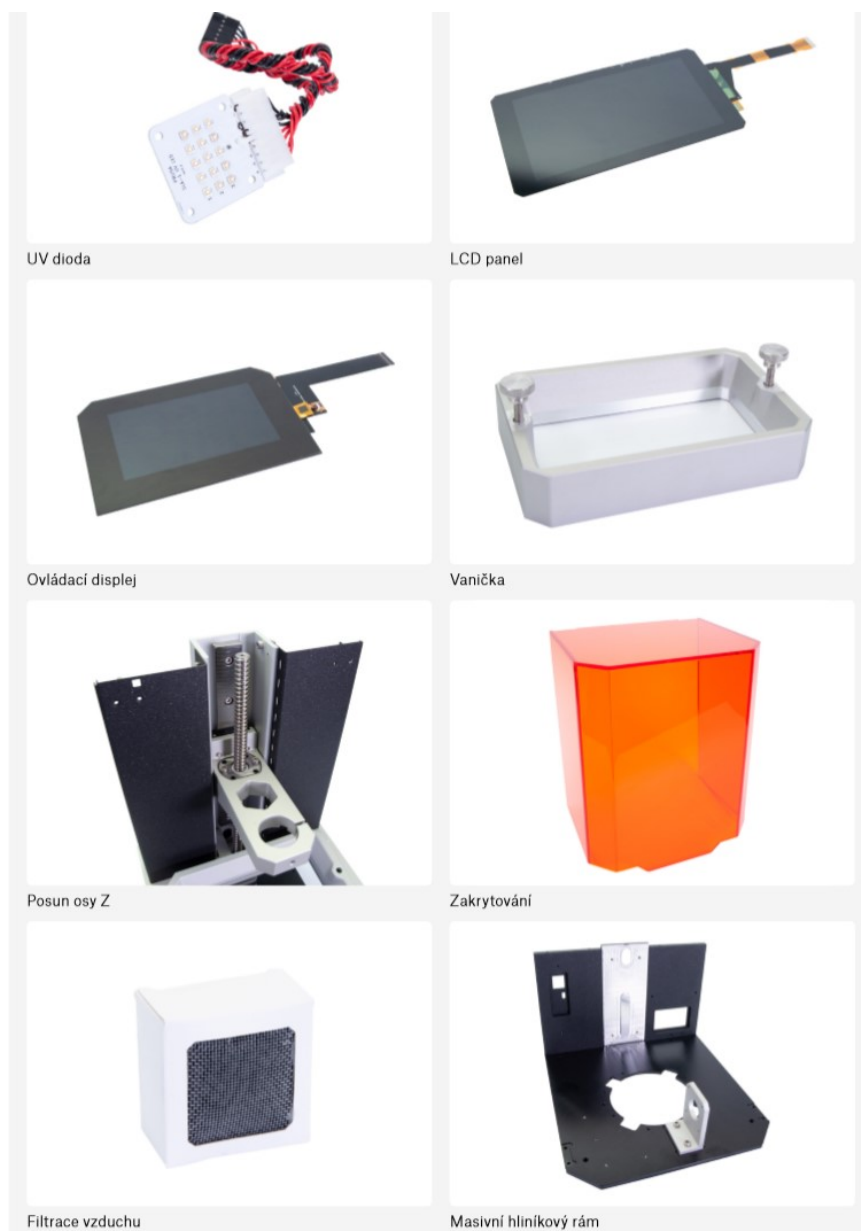
K posuvu dochází pouze v ose Z, žádné další posuvy v osách X a Y nejsou díky maskování LCD panelu potřeba.

## Zakrytování

Tiskárna je vybavena průhledným krytem obvykle červené, oranžové, zelené či žluté barvy, jehož úkolem je omezení přístupu UV světla, například ze slunečního svitu, směrem do tiskárny, což by způsobilo nechtěné samovolné vytvrzování pryskyřice a také zabraňuje UV světlu vyzářenému diodou průchod směrem ven. Další důležitý úkol zakrytování je zamezení šíření nebezpečných výparů z pryskyřice do okolí.

## Masivní rám

Masivní rám, často vyrobený z hliníku, zaručuje tuhost a stabilitu celé konstrukce tiskárny. Nestabilní a měkký rám má negativní vliv na kvalitu a přesnost tisku. [4]



Obrázek 3.22 – Komponenty MSLA tiskárny [4]

### 3.3.6 Materiály

Rozdělení materiálů není podle typu tiskárny, ale podle účelu výsledného výrobku. Rozdíly mezi materiály jsou dány přidáváním příměsí či barviv. Zde je ukázka nejpoužívanějších druhů světlocitlivých pryskyřic. [4]

#### Standartní

Základní pryskyřice – vhodná pro prototypy a modely, dostupná ve třech odstínech (černá, šedá, bílá), výhodou je hladký a detailní povrch, nevýhodou je křehkost.

Čirá pryskyřice (Clear Resin) – vhodná pro použití, kde je vyžadován čistý průsvitný výtisk, například osvětlení nebo optické mechanismy.

#### Konstrukční

Šedá pryskyřice Pro (Grey Pro Resin) – nejvíce používaná pryskyřice pro tisk univerzálních prototypů, od opakovaně používaných funkčních prototypů po přesné předlohy pro zaformování. Mezi výhody patří vysoká přesnost.

Pevná pryskyřice (Rigid Resin) – díky vyztužení sklem nabízí kombinaci přesnosti, tuhosti a lesklého povrchu. Vysoce odolná vůči deformacím. Použití pro modely lopatek turbín a větráků, nástrojů nebo skříní v automobilovém průmyslu.

Vysokoteplotní pryskyřice (High Temp Resin) – Je vhodná pro statické použití při vysokých teplotách nebo při výrobních procesech, jako jsou tváření či odlévání za tepla.

#### Šperkařské

Odlévací pryskyřice (Castable Resin) – materiál schopný zachytit velmi přesné detaily a jemné povrchy.

#### Dentální

Dentální modelová pryskyřice (Dental Model Resin) – materiál navržený pro vysoce přesné a detailní modely korunek a můstků [28]



Obrázek 3.23 – Ukázka odlévací pryskyřice [29]



Obrázek 3.24 – Šedá pryskyřice Pro [30]

### 3.3.7 Výhody a nevýhody

Výhody [31] [32]

- Oproti FDM technologii je tisk detailnější
- Tisk je po vytvrzení ideálně hladký, často nepotřebuje další povrchové úpravy
- V porovnání s jinými technologiemi 3D tisku nabízí technologie SLA velkou tiskovou plochu
- Díky extrémní míře detailu SLA tiskárny naleznou uplatnění v lékařství a šperkařství
- Spektrum materiálů se neustále rozšiřuje
- Výrobky vytištěné technologií SLA jsou vodotěsné, což je velmi důležitá vlastnost pro strojírenské a další aplikace, kde musí být regulován průtok vzduchu nebo kapaliny. Konstrukteři používají vodotěsnost SLA výrobků k řešení problémů proudění vzduchu a tekutin pro použití v automobilovém průmyslu, biomedicíně výzkumu a k ověřování návrhů součástí pro spotřební výrobky, jako jsou kuchyňské spotřebiče.
- Velká výhoda v porovnání s technologií FDM je produkce téměř izotropních součástí

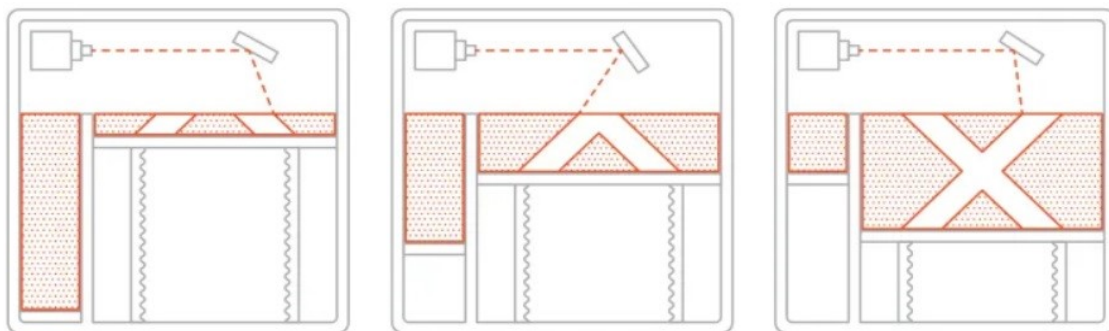
Nevýhody [31]

- Toxicita pryskyřice – potřeba vyhnout se kontaktu pryskyřice s pokožkou a dýchání nebezpečných výparů při tisku
- Vysoká cena fotocitlivých pryskyřic
- Výtisk musí projít následným zpracováním
- Široká škála materiálů vyžadující odbornou znalost
- Potřeba použití podpor při složitějších geometriích
- Díl musí mít otvor, kterým světlocitlivá pryskyřice vyteče z dutin ven

### 3.4 SLS (Selective Laser Sintering)

#### 3.4.1 Princip technologie

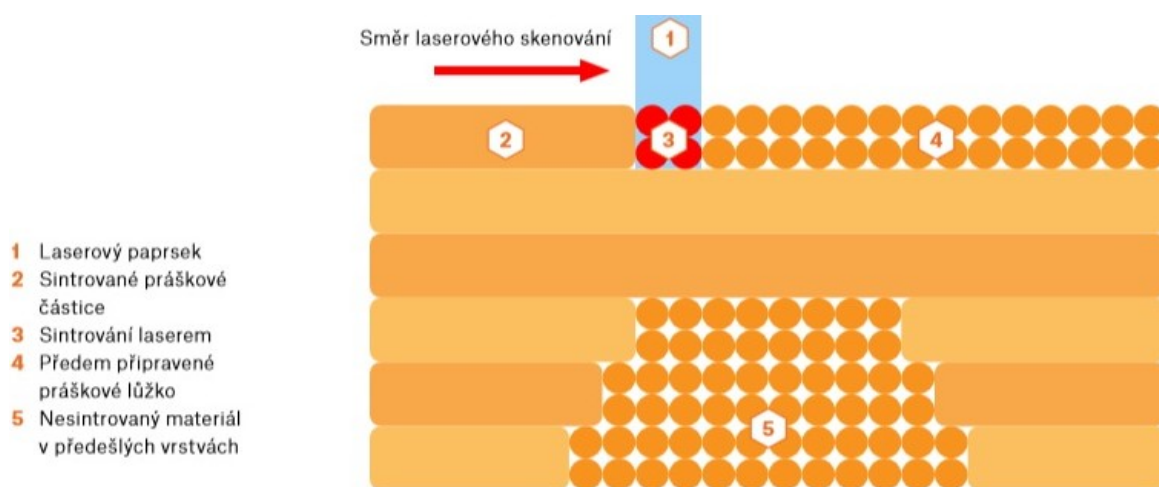
Selective Laser Sintering je technologie 3D tisku, v češtině nazývaná selektivní spékání (sintrování) laserem, která patří do skupiny Power Bed Fusion. Princip technologie spočívá ve spékání polymerního práškového materiálu. Práškový materiál je spékán po tenkých vrstvách v ploše řezů podle digitálního modelu pomocí vysoce výkonného laseru. [4] [33] [34]



Obrázek 3.25 – Princip metody SLS [34]

#### 3.4.2 Průběh tisku

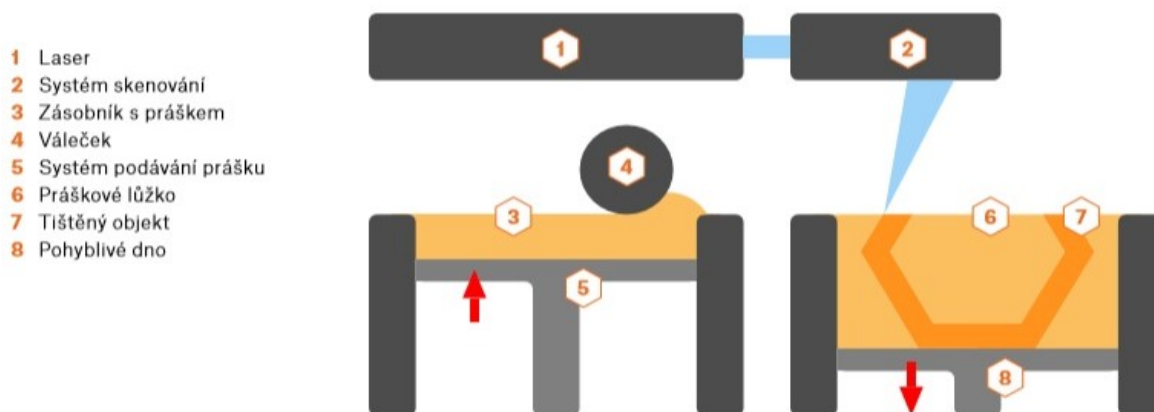
CO<sub>2</sub> laser skenuje průřez 3D modelu a zahřívá prášek na teplotu spečení materiálu. Například materiál polyamid PA12 musí být spékán při 160 až 200 °C. Tím jsou částice mechanicky spojeny a vytvoří jeden pevný celek. Nepoužitý prášek podporuje součást během tisku a eliminuje potřebu tvorby podpor. Během tisku další vrstvy dochází k poklesu pohyblivého dna o výšku jedné vrstvy, nanesení vrstvy materiálu pomocí válce na práškové lůžko a ke spečení laserem. Tisk končí zasypáním celého modelu v tiskovém materiálu, proto je potřebné při tvorbě dutého modelu umožnit vysypání nespečeného materiálu. Poté je hotový model postupně ochlazován uvnitř tiskárny. [4] [33] [34]



Obrázek 3.26 – Průběh tisku metodou SLS [4]

Proces laserového spékání je citlivý na velké množství fyzikálních parametrů. Zprvée, suchý prášek musí být dostatečně sypký, aby vytvořil hladkou vrstvu, když je přemístěn válečkem nebo jiným rozprostíracím mechanismem. Dále musí prášek absorbovat dostatečné množství energie laseru ke spečení v daném místě, aniž by teplota okolního prášku byla dostatečně horká, aby došlo k její degradaci.

Parametry tisku zahrnují teplotu dílčí vrstvy, teplotu práškového lůžka, tloušťku práškové vrstvy, výkon laseru, rozteč skenů, počet skenů, čas mezi vrstvami, rychlost válce, velikost výtisku a rychlosti zahřívání / chlazení. [35]



Obrázek 3.27 – Komponenty SLS 3D tiskárny [4]

### 3.4.3 Dokončovací operace

Výrobky vytištěné SLS tiskárnou obvykle vyžadují minimální zpracování, jsou přesné a pevné. Po dokončení tisku je potřebné ponechat vytisknutý výrobek postupně vychladit. Celý tento proces probíhá v dusíkové atmosféře, aby se zabránilo oxidaci prášku. Poté je vyjmut z práškového lůžka, oddělen a očištěn od přebytečného prášku. Vzhledem k povaze procesu spékání prášku mají vytištěné výrobky drsný a pórovitý povrch.

K odstranění prášku se využívá stlačený vzduch a čištění tryskáním plastových kuliček, aby se odstranil veškerý nespečený prášek, který ulpěl na povrchu. Drsnost povrchu je vhodná k barvení nebo lakování. K dosažení hladkého povrchu lze využít vibrační leštění, kdy je povrch omílán malými keramickými tělísky. Další možnost je voděodolná úprava povrchu. [34] [36]



Obrázek 3.28 – Leštění modelu pomocí vibrací [36]

### 3.4.4 Materiály

#### Nylon

Nejběžnějším materiálem pro SLS technologii je nylon, oblíbený technický termoplast díky lehkosti, pružnosti a odolnosti. Nylon je odolný vůči chemikáliím, teplu, UV světlu, vodě a nečistotám, tudíž je ideální volbou pro výrobu prototypů i funkčních součástí. Nylon je syntetický termoplastický polymer, který patří do skupiny polyamidů. Nejčastěji používaný je Nylon 11 a Nylon 12, neboli polyamid (PA) 11 a 12. Oba mají podobné materiálové vlastnosti, PA11 je o něco pružnější a odolnější vůči nárazu, zatímco PA12 je pevnější, odolnější vůči otěru a biokompatibilní. [38] Mechanické vlastnosti vzorků SLS vytištěných pomocí standardního polyamidového prášku PA12 jsou uvedeny v následující tabulce 3.2.

Tabulka 3.2 Srovnání mechanických vlastností PA12 [37]

	Směr X-Y	Směr Z
Mez pevnosti	48 MPa	42 MPa
Modul pružnosti v tahu	1650 MPa	1650 MPa
Tažnost	18 %	4 %

PA11 a PA12 jsou oba jednosložkové práškové materiály, ale 3D tiskárny SLS mohou také tisknout dvousložkové prášky. Nylonové kompozity s hliníkem, uhlíkem nebo sklem jsou vyvinuty pro optimalizaci dílů pro vyšší pevnost, tuhost nebo flexibilitu. [38]

#### Alumid

Alumid (hliníkem plněný polyamid) je směs polyamidového a hliníkového prášku. Tento materiál je odolný vůči vysokým teplotám (130 °C) a má dobrou obrobitelnost kovově vypadajících dílů. [39] [40]



Obrázek 3.29 – Vzhled materiálu Alumid [40]



Obrázek 3.30 – Materiál Alumid [40]



### 3.4.5 Výhody a nevýhody

Výhody [38] [41]

- Technologie SLS dokáže vytisknout výrobky srovnatelné kvality jako konvenční výrobní metody
- Model je neustále obklopen zbytkovým nespečeným materiálem, který nahrazuje použití podpůrných materiálů
- Dobrá chemická odolnost
- Přebytkový prášek lze použít k dalšímu tisku
- Vynikající pevnost mezi vrstvami, což znamená, že díly mají téměř izotropní mechanické vlastnosti
- Díly lze díky pórovitosti snadno obarvit
- Jelikož modely nepotřebují při tisku podpory, lze tisknout modely se složitou geometrií (viz obrázek 3.31 a 3.32)



Obrázek 3.31 – Složitá geometrie vytisknuta SLS [42]



Obrázek 3.32 – Složitá geometrie vytisknuta SLS [38]

Nevýhody [38] [41]

- Výtisky jsou na povrchu pórovité, což lze vyřešit povrchovou úpravou
- Vysoká pořizovací cena SLS tiskáren
- Limitovaná škála použitelných materiálů
- Vzhledem k pórovitosti mohou díly bez povrchové úpravy vlivem vlhkosti změnit své mechanické vlastnosti
- Modely jsou náchylné ke smršťování v průběhu chlazení, typické smrštění o 3 až 3,5 %
- V důsledku smršťování dochází k vnitřnímu napětí, což způsobuje deformaci velkých ploch
- Vzhledem k vysoké ceně tiskáren a bezpečnosti není tato technologie vhodná k domácímu použití

### 3.5 HP Multi Jet Fusion

Jedná se o novou technologii 3D tisku, vytvořenou společností HP, který byla uvedena na trh poprvé v roce 2014. HP Multi Jet Fusion je technologie, která pro výrobu používá práškový materiál bez použití laserů. Lze ji použít i pro sériovou výrobu a nabízí možnost tisku plnobarevných modelů. [43]

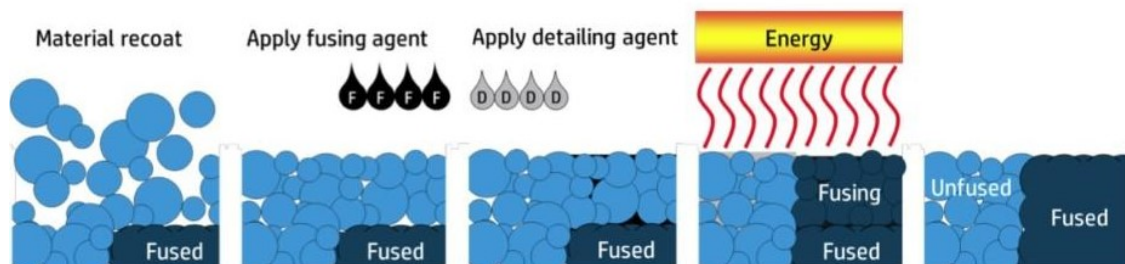


Obrázek 3.33 – Tiskárna HP Jet Fusion 4200 [44]

#### 3.5.1 Princip a průběh tisku

Začátek procesu 3D tisku technologií HP Multi Jet Fusion spočívá v nanesení potřebného množství materiálu ve formě prášku, rozprostření materiálu s využitím rotačního válce na práškové lože, které je umístěno ve velké komoře, a rovnoměrném zahřátí materiálu. Poté je na místa, ve kterých je potřebné materiál selektivně roztavit a spojit, nanese spojovací činidlo (fusing agent) a po obvodu vnějších kontur výtisku je přitom nanese činidlo zajišťující vysokou přesnost povrchových detailů (detailing agent). Činidla jsou nanasena stříkem tiskovými hlavicemi. Následně je tisková plocha ozářena pomocí UV lampy a dochází k pohlcení tepelné energie v místech, kde bylo aplikováno tavící činidlo a ke spečení materiálu. Prášek obsahující tavící činidlo se zahřívá rychleji než prášek bez tavícího činidla, což vytváří podstatný teplotní rozdíl mezi pevným spečeným a nespečeným práškovým materiálem, který pomáhá vytvořit přesnější okraje a detaily na obrysu výtisku. Vrstvení práškového materiálu, nanesení činidel a vytvrzení požadovaných míst je opakováno do doby, než je výtisk dokončen. Výhodou technologie je konstantní čas tisku jedné vrstvy. [45] [46] [47]

V současné době je nejvíce používaným materiálem polyamid 11 a 12, z důvodu velmi jemného prášku, který umožňuje tisk tenkých vrstev. [47]



Obrázek 3.34 – Princip technologie Multi Jet Fusion [45]

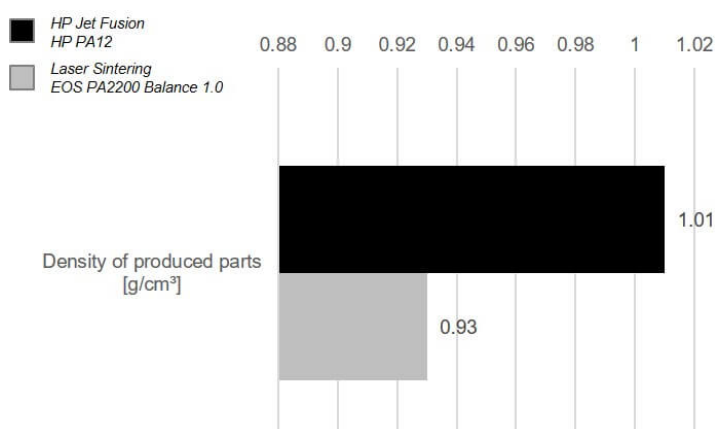


### 3.5.2 Srovnání technologie Selective Laser Sintering a HP Multi Jet Fusion

Princip technologie HP Multi Jet Fusion je podobný jako u technologie Selective Laser Sintering (SLS). U obou technologií dochází ke zpracování materiálu ve formě prášku, nejčastěji polyamidu 11 a 12, což vybízí ke srovnání. Hlavní rozdíl je zdroj tepla. Zatímco u technologie SLS dochází k zahřátí práškového materiálu na teplotu, kdy jsou částice prášku spojeny pomocí laseru bez jeho roztavení, u technologie HP Multi Jet Fusion dochází k nanesení spojovacího činidla, dodání energie UV lampou a roztavení práškového materiálu. Zde je uvedeno srovnání vlastností vytištěných vzorků z materiálu PA12. Uvedené hodnoty jsou pouze informativní. Jednotlivé hodnoty se mohou lišit v závislosti na tvaru výrobku nebo nastavení 3D tiskárny.

#### Měrná hmotnost (Density)

Součástí vytištěné technologií SLS jsou poréznější a mají nižší měrnou hmotnost.

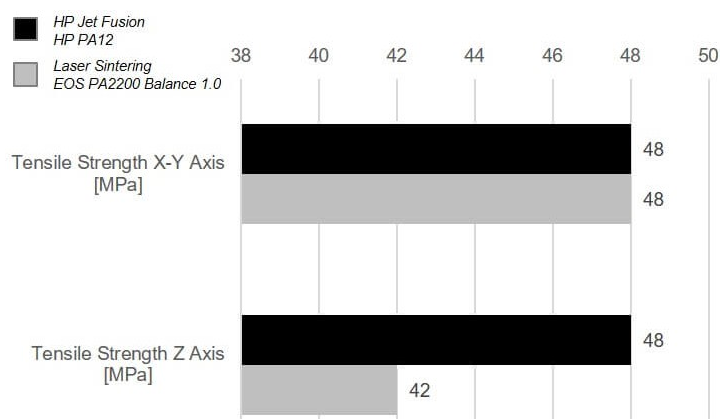


Obrázek 3.35 – Srovnání měrné hmotnosti při použití technologie HP Multi Jet Fusion a SLS [48]

#### Mechanické vlastnosti

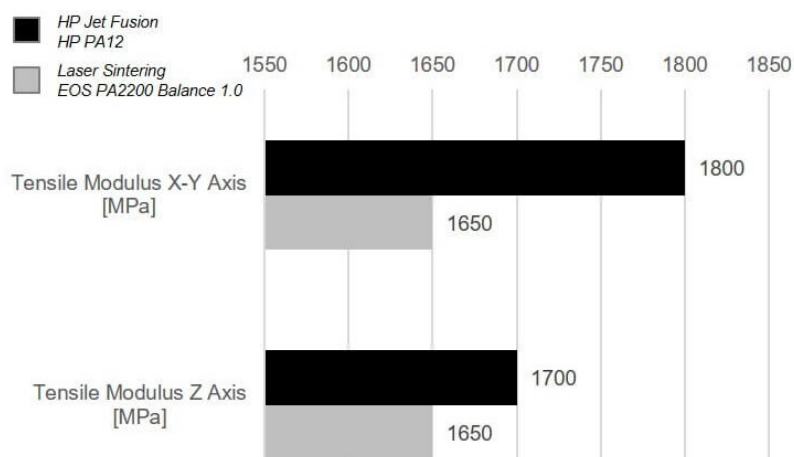
Při srovnání jsou mechanické vlastnosti ve směrech rovnoběžných s rovinou tisku (X–Y) u obou technologií srovnatelné. Rozdíl nastává ve směru kolmém na rovinu tisku (Z), kde výtisky vyrobené technologií HP Multi Jet Fusion vykazují lepší mechanické vlastnosti.

Na Obr. 3.36 můžeme pozorovat rozdíly hodnot meze pevnosti v tahu (Tensile Strength). Zatímco u technologie HP Multi Jet Fusion jsou hodnoty meze pevnosti v tahu shodné ve všech směrech, u technologie SLS lze pozorovat rozdíl mezi směr X-Y a Z.



Obrázek 3.36 – Srovnání meze pevnosti v tahu při použití technologie Multi Jet Fusion a SLS [48]

Další veličinou popisující mechanické vlastnosti je modul pružnosti v tahu (Tensile Modulus). Na Obr. 3.37 lze pozorovat, že výtisky vyrobené technologií HP Multi Jet Fusion mají ve všech směrech vyšší hodnotu modulu pružnosti v tahu než výtisky vyrobené technologií SLS.



Obrázek 3.37 – Srovnání modulu pružnosti v tahu při použití technologie HP Multi Jet Fusion a SLS [48]

Velký rozdíl mezi osou X-Y a Z lze pozorovat u technologie SLS na Obr. 3.38, který porovnává tažnost (Elongation at break) výtisků.



Obrázek 3.38 – Srovnání tažnosti při použití technologie HP Multi Jet Fusion a SLS [48]

Dalším rozdílem mezi zmíněnými technologiemi je rozdílná drsnost povrchu. Ačkoli obě technologie používají materiál ve formě prášku se srovnatelně velkými částicemi, součásti vytištěné technologií HP Multi Jet Fusion mají menší drsnost povrchu, přičemž kvalita povrchu je dána homogennější strukturou výtisků.

Poslední ze zmíněných rozdílů je čas tisku, který je včetně předehřátí a chlazení kratší u technologie HP Multi Jet Fusion. [48] [49]

### 3.5.3 Výhody a nevýhody

Výhody [43] [46] [50]

- Velmi vysoká přesnost tisku
- Dobré mechanické vlastnosti výrobků srovnatelné s výrobky vyrobenými standardním vstřikováním do formy
- Rychlá technologie 3D tisku
- Vhodná technologie pro výrobu prototypů i malosériovou výrobu
- Konstantní čas tisku jedné vrstvy – možnost tisku několika součástí najednou za stejný čas
- Vynikající kvalita povrchu – výrobek lze použít bez dodatečných úprav
- Technologie má široké uplatnění – automobilový průmysl, zubní laboratoře, zdravotnické pomůcky, letectví



Obrázek 3.39 – Součást respirátorů vyrobená metodou HP Multi Jet Fusion [46]

Nevýhody [43] [46] [50]

- Malá nabídka materiálů
- Vysoká pořizovací cena tiskárny
- Omezený prostor při tisku
- Mladá a nepříliš rozšířená technologie 3D tisku
- Technologie není vhodná k domácímu použití

### 3.6 Přehled dalších technologií

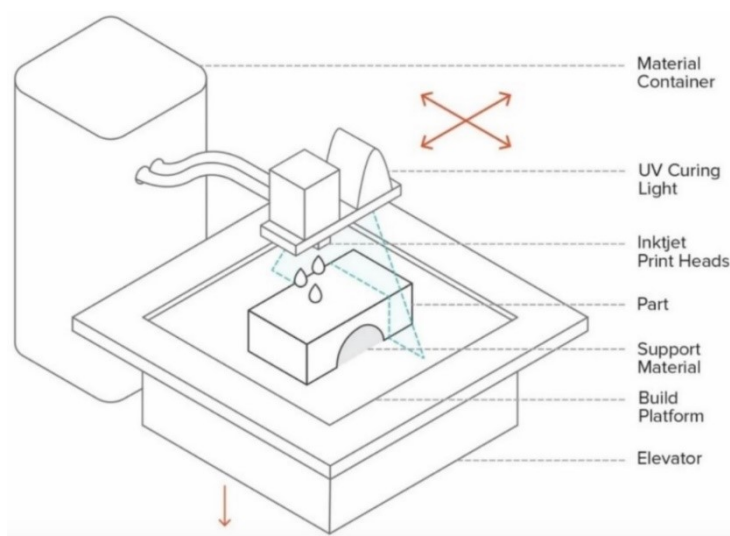
#### 3.6.1 DMLS (Direct metal laser sintering)

Tato technologie patentována v roce 1987 je založena na tisku kovových výrobků, které lze posléze obrábět a dále zpracovávat. Princip technologie DMLS je stejný jako u technologie SLS, práškový materiál je spékán v tenkých vrstvách pomocí laseru. Hlavní rozdíl je ve výkonu laseru. Ke spékání kovových prášků je potřeba vyvinout podstatně vyšší teplotu než ke spékání polymerních prášků. Mezi výhody této technologie patří výroba složitých tvarů bez použití podpor a kvalitní povrch s možností tisku jemných detailů, mezi nevýhody patří vysoká pořizovací cena tiskárny. [51]

#### 3.6.2 PolyJet

PolyJet je technologie 3D tisku, která vytváří součásti nanášením postřiku velmi tenké vrstvy tekutého fotopolymeru na tiskovou podložku a okamžitým vytvrzením pomocí UV světla. Výsledkem tisku jsou modely, které jsou bez nutnosti dalšího zpracování vytvrzené a se kterými lze okamžitě manipulovat. K podepření modelů se složitou geometrií je využíván gelový podpůrný materiál, který je následně odstraněn proudem vody. Je to jedna z nejrychlejších a nejpresnějších technologií 3D tisku, které jsou v současné době k dispozici. Výhoda je možnost tisku modelu z více materiálů. Mezi ideální aplikace patří výroba modelů s jemnými detaily a hladkým povrchem nebo formy pro plastové díly. [52]

Jak lze vidět na obrázku 3.40, PolyJet tiskárna se skládá ze zásobníku na materiál (Material Container), podložky, na které probíhá tisk (Build Platform) dané součásti (Part), případně podpůrného materiálu (Support Material), posuvné platformě, na které je připevněn zdroj UV světla k vytvrzování (UV Curing Light) a tryskové tiskové hlavy (Inkjet Print Heads). [53]



Obrázek 3.40 – Schéma PolyJet tiskárny [53]

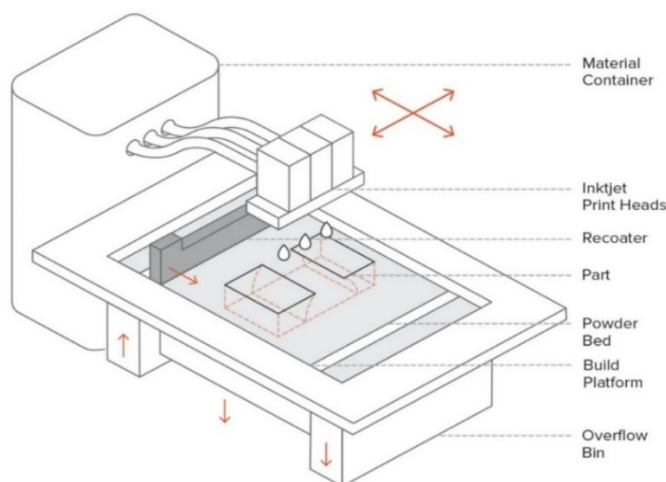
### 3.6.3 LOM (Laminated Object Manufacturing)

Výroba laminovaných objektů (LOM) je technologie 3D tisku, která je využívána k výrobě zejména prototypů. Během procesu tisku jsou vrstvy nejčastěji papíru, plastů nebo kovových plátů postupně slepeny dohromady za použití tepla a tlaku.

LOM tiskárna se skládá z tiskové plochy, která je potažená vrstvou materiálu pomocí systému podávajících válců. Plastové a papírové materiály jsou často potaženy lepidlem. Pro vytvoření prototypu je zahřátý válec veden přes vrstvu materiálu na tiskové ploše, dochází k roztavení lepidla a přitlačením na předchozí vrstvu materiálu jsou vrstvy spojeny. Po spojení 2 vrstev je materiál ořezán, nejčastěji pomocí počítačem řízeného laseru do požadovaného tvaru. Po vytvoření vrstvy se tisková plocha sníží o výšku jedné vrstvy, nová vrstva materiálu je položena na tiskovou plochu, zahřátý válec je veden přes vrstvu materiálu, opět dochází ke spojení s předchozí vrstvou a vyřezání požadovaného tvaru dané vrstvy. Tento proces se opakuje, dokud není vytvořen celý prototyp. [54] [55]

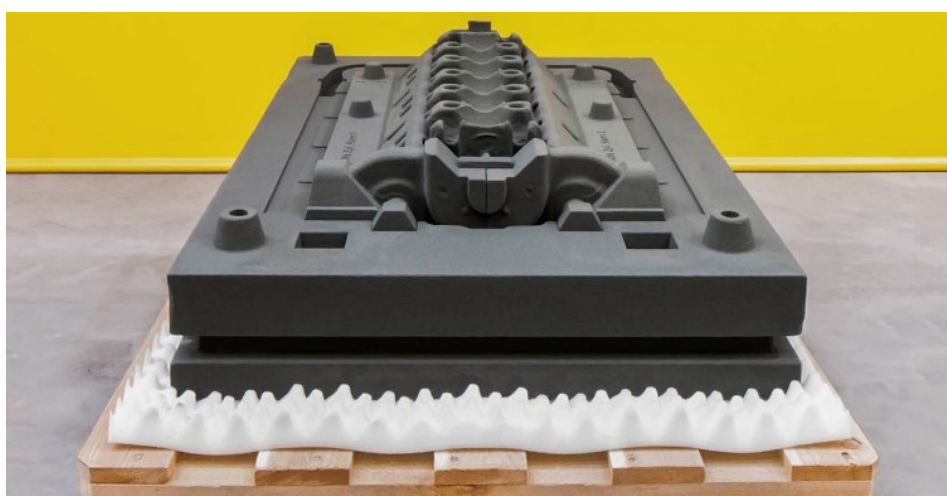
### 3.6.4 Binder Jetting

V technologii Binder Jetting je na vrstvu práškového materiálu naneseno pojivo na bázi polymeru (Binder), spojující oba materiály dohromady za vzniku pevné součásti (Part). Před tiskem je potřebné vložit prášek do zásobníku na prášek (Material Container). Rozprostíracím mechanismem (Recoater) je rozprostřena tenká vrstva prášku na tiskové ploše (Build Platform). Poté tisková hlava s tryskami (Inkjet Print Heads) přejíždí přes tiskovou plochu s vrstvou prášku a selektivně nanáší kapky polymerního pojiva, které spojují částice prášku dohromady. Když je vrstva hotová, dojde k nanesení další vrstvy prášku a pojiva. Proces se pak opakuje, dokud není celý výrobek dokončen. Po tisku je výrobek zapouzdřen v prášku. V závislosti na materiálu je vyžadován krok dodatečného zpracování a odstranění přebytečného nespojeného prášku, například je výsledný výtisk vypálen v peci a dle potřeby finálně upraven.



Obrázek 3.41 – Schéma Binder Jetting tiskárny [56]

Klíčovou výhodou technologie Binder Jetting oproti jiným 3D tiskovým technologiím je to, že k tisku dochází při pokojové teplotě. To znamená, že oproti jiným technologiím (FDM, SLS, DMSL, SLA) nedochází k deformaci vlivem teplotní roztažnosti materiálu. Výhodou je možnost výroby velkých součástí ve srovnání s ostatními technologiemi. Kromě toho Binder Jetting nevyžaduje žádné podpůrné struktury, okolní prášek poskytuje součásti veškerou potřebnou podporu. K tisku lze použít širokou škálu kovových prášků, keramiky, nebo písků, které nevyžadují žádné dodatečné zpracování. Práškový materiál je také finančně výhodný. Mezi nevýhody patří špatné mechanické vlastnosti bez dodatečného zpracování výrobků. Mezi nejčastější využití díky velikosti a přesnosti slouží výroba forem a jader k odlévání. [56] [57] [58]



Obrázek 3.42 – Forma k odlévání vytvořená technologií Binder Jetting [58]

### 3.7 Výběr technologie 3D tisku

V předchozích kapitolách byly krátce shrnuty nejznámější a nejvyužívanější technologie 3D tisku. Neexistuje technologie vhodná pro tisk veškerých výrobků. Při výběru technologie tisku je potřebné zamyslet se nad několika kritérii, která naši volbu ovlivní. Nyní si položíme pár základních otázek, které nám s výběrem technologie můžou pomoci. [59]

- Bude výrobek namáhán staticky nebo dynamicky?
- Jaký je rozpočet pro tisk výrobku?
- Jaký povrch je vyžadován?
- Bude povrch po tisku leštěn, broušen, tepelně ošetřen, barven?
- Jaké jsou minimální a maximální tloušťky stěny pro ploché i zakřivené části?
- V jaké ose může a měla by být součást tisknuta a namáhána?
- Je vhodné použít 3D tisk namísto standartních výrobních technologií?
- Jak bude hotový díl spojován s ostatními komponenty?
- Jak lze součást vyrobit, aby se minimalizovalo riziko poškození při následném zpracování?
- Jakých detailů potřebujeme při tisku dosáhnout?
- Jaké vlastnosti má mít materiál hotového výrobku, například elektrická a tepelná vodivost, tepelná roztažnost, izotropie mechanických vlastností?
- Jaká je požadovaná přesnost?
- Jaký je možný čas tisku?
- Jaké jsou bezpečnostní podmínky při tisku?



## 4 Proces 3D tisku

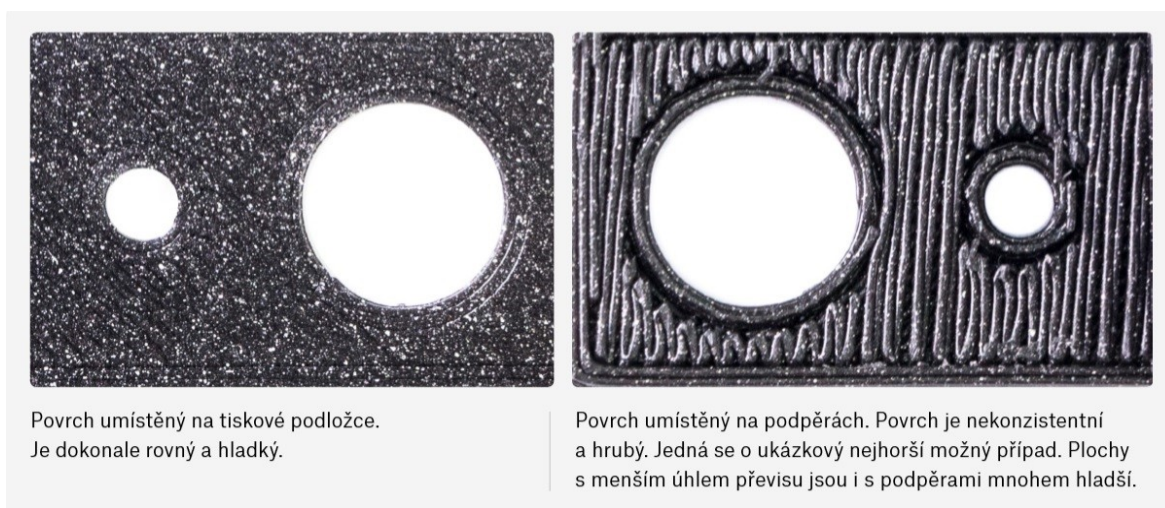
Proces 3D tisku lze rozdělit do 3 hlavních částí

1. Získání požadovaného 3D modelu
2. Příprava modelu pro tisk
3. Samotný proces tisku

### 4.1 Získání 3D modelu

K tisku výrobku je potřeba získat model, který je typicky ve formátu STL. Model výrobku můžeme získat stažením hotového modelu z internetu, vymodelováním vlastního modelu nebo 3D skenováním existujícího objektu. Pro vytvoření vlastního modelu lze použít některý z široké nabídky nástrojů pro 3D modelování, od jednoduchých webových aplikací, přes parametrické modelování (např. program OpenSCAD) pomocí zdrojového kódu, po profesionální nástroje (např. Autodesk Fusion 360). V technické praxi jde importovat model do souboru STL ze softwarů jako Autodesk Inventor, Rhinoceros 3D, SolidWorks nebo Autodesk AutoCAD.

Důležitá je také orientace modelu při tisku, která ovlivní vzhled výsledné součásti i mechanické vlastnosti. Výsledná součást má obvykle menší pevnost ve směru rovnoběžném s vrstvami než kolmo na vrstvy. Při modelování je také důležité uvažovat tolerance, jelikož u většiny technologií dochází k deformaci modelu v důsledku tepelné roztažnosti materiálu. Je také vhodné zvážit rozdělení součástí na více částí, jak bylo dříve zmíněno v kapitole 3.2 o FDM technologii u tisku koule. [4]



Obrázek 4.1 – Vliv orientace modelu při tisku [4]

Každá technologie 3D tisku vyžaduje jiné požadavky, například minimální tloušťku stěny, otvory pro vysypání nespečeného materiálu (například u technologie SLS) nebo orientaci při tisku pro nejsnadnější odstranění podpor. Proto je při návrhu modelu důležité znát jednotlivé technologie. [60]

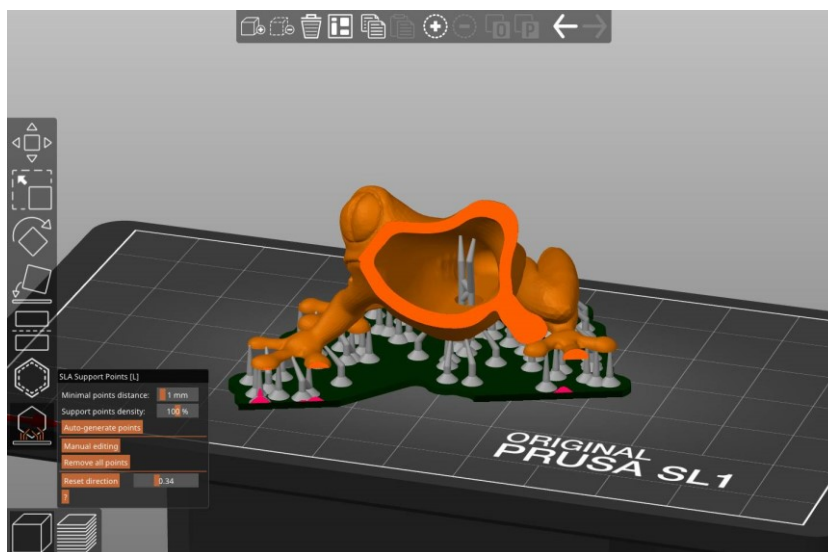


## 4.2 Příprava modelu pro tisk

Dalším krokem při procesu tisku je tzv. slicování. Slicování znamená převod 3D modelu ve formátu STL na strojový G-code. 3D model je potřeba připravit na 3D tisk pomocí speciálního softwaru, obecně zvaný slicer, který převádí model do strojových pokynů pro tiskárnu.

Nejdříve dochází k importování modelu do sliceru. Do sliceru jsou zadávány informace o typu materiálu k tisku, například typ filamentu, teplota tavení materiálu a předehřátí tiskové podložky podle doporučení výrobce, hustota výplně, tloušťka stěny nebo výška vrstvy. Slicer model prakticky rozdělí na jednotlivé vrstvy. Pomocí sliceru je určena poloha modelu na tiskové podložce během procesu tisku, počet objektů k tisku, pootočení modelu. Velká část výrobců 3D tiskáren poskytuje pro své zákazníky vlastní slicer, optimalizovaný pro jeho produkty a databázi tiskových materiálů včetně tiskových profilů. Další z hlavních funkcí sliceru je generování podpěr nutných při tisku součástí se složitější geometrií. Některé slicery dokonce nabízejí uživatelům možnost zvolit si různé typy podpurných struktur pro snazší odstranění nebo stabilitu. Výsledkem slicování je již zmíněný G-code, který obsahuje veškeré informace potřebné k tisku.

Před samotným spuštěním tisku je potřeba připravit materiál k tisku a tiskovou podložku podle zvolené technologie a použitého materiálu. [4] [61]



Obrázek 4.2 – Ukázka prostředí sliceru PrusaSlicer [62]

## 4.3 Spuštění tisku

Po vygenerování G-codu a přípravě podložky, materiálu i tiskárny dochází k samotnému procesu tisku. Spuštění tisku probíhá posláním a čtením G-codu v 3D tiskárně. Během celého procesu tisku musí být zaručen přístup tiskárny ke G-codu. To lze zaručit například připojením tiskárny k počítači nebo tisk z SD karty či obdobného média, které je s tiskárnou kompatibilní. Po dokončení tisku může přijít na řadu následné zpracování podle typu použité technologie, jak bylo zmíněno dříve. [4]

## 5 Analýza mechanických vlastností

K návrhu a pevnostní analýze výrobku vyrobeného technologií 3D tisku je potřebné zjistit mechanické vlastnosti použitého materiálu. Tyto vlastnosti závisí na zvolené technologii, tiskárně a nastavení výrobních parametrů.

### 5.1 Mechanické vlastnosti polymerů

Mechanické vlastnosti polymerů určují chování materiálu během mechanického namáhání, které vyvolá deformaci nebo porušení materiálu. Mezi základní mechanické vlastnosti řadíme pružnost, pevnost, plasticitu a houževnatost. Ke zjišťování a porovnávání mechanických vlastností jsou určeny jednotné a přesně definované zkoušky a většina zkoušek je normalizovaná. Podle způsobu lze zkoušky rozdělit na zkoušku tahem, tlakem, ohybem, krutem a střihem. [63]

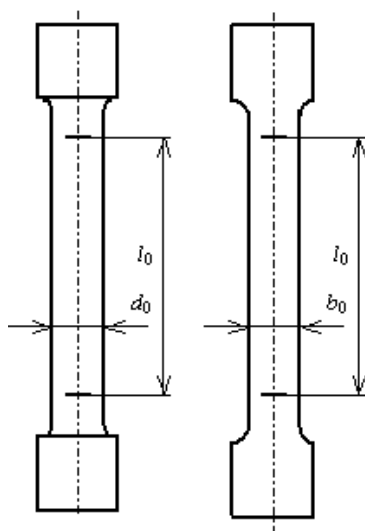
### 5.2 Tahová zkouška

Ke zjištění mechanických vlastností vzhledem k mechanickým vlastnostem použitým při numerické analýze modelu z materiálu PA11 byla vybrána zkouška tahem.

#### 5.2.1 Princip tahové zkoušky

Jedná se o základní a nejčastěji používanou zkoušku, kdy je zkušební těleso vystaveno jednoosému namáhání v tahu. Zkouška tahem spočívá v postupném zatěžování vzorku axiální silou, dokud nedojde k přetržení vzorku s cílem určit pevnostní a plastické vlastnosti materiálu. Zkušební vzorek může mít kruhový nebo obdélníkový průřez. Zkouška je realizována na trhacích strojích doplněných o extenzometr. Trhací stroje mohou být založeny na hydraulickém nebo elektromechanickém principu.

Na obrázku 5.1 můžeme vidět tvar normalizovaného zkušebního vzorku, na levé straně je tyč kruhového průřezu s počátečním průměrem  $d_0$  a počáteční měřenou délkou  $l_0$  a na pravé straně tyč obdélníkového průřezu s počáteční šířkou  $b_0$  a počáteční měřenou délkou  $l_0$ . Konce zkušebních vzorků jsou vhodně upraveny k uchycení v čelistech. [64] [65]



Obrázek 5.1 – Normalizované tvary zkušebních vzorku [66]

### 5.2.2 Průběh tahové zkoušky

Pro provedení tahové zkoušky je zkušební vzorek normalizovaného tvaru upnut v čelistech trhacího stroje a na vzorek je nasazen extenzometr neboli průtahoměr. Zkušební vzorek je nejčastěji ve tvaru oboustranných lopatek, což umožňuje spolehlivé upnutí v čelistech trhacího stroje a koncentraci napětí do zúžené části vzorku. Před zkouškou je nutné změřit rozměry vzorku.

Po upnutí do čelistí je vzorek namáhán tahem v podélné ose vzorku obvykle konstantní rychlostí až do přetržení vzorku. Rychlost prodlužování je nastavena před zahájením operace a udává se v milimetrech za minutu. V průběhu zkoušky zkušební stroj zaznamená zatěžující osovou sílu  $F$  [N] a extenzometr prodloužení  $\Delta l$  [mm] zkušební části vzorku.

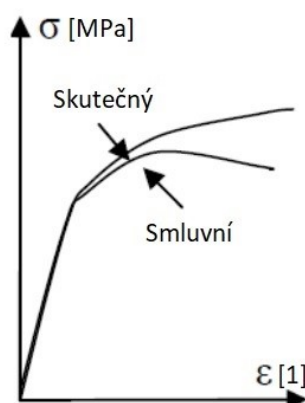
Primárním výsledkem tahové zkoušky je diagram závislosti mezi osovou silou  $F$  a prodloužením vzorku  $\Delta l$ . Tento diagram ale není běžně používán. V praxi se nejčastěji setkáme s diagramem závislosti napětí  $\sigma$  na poměrném podélném prodloužení  $\varepsilon$ . Tento diagram se nazývá smluvní diagram. Hlavním důvodem zobrazení grafu  $\sigma$ – $\varepsilon$  je nezávislost na průměru a délce zkušební části vzorku. Napětí získané ze smluvního diagramu se nazývá smluvní napětí. K přepočtení grafu slouží rovnice

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad , \quad (5.1)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad , \quad (5.2)$$

kde

- $F$  [N] je osová síla,
- $S_0$  [mm<sup>2</sup>] je počáteční plocha průřezu zkušebního vzorku,
- $\Delta l$  [mm] je prodloužení zkušební části vzorku,
- $l_0$  [mm] je počáteční měřená délka zkušebního vzorku.



Obrázek 5.2 – Porovnání smluvního a skutečného diagramu [65]

Při namáhání zkušebního vzorku dochází ke zvětšování délky a zmenšování plochy průřezu. Výpočet skutečného napětí je založen na okamžité hodnotě plochy  $S$  [mm<sup>2</sup>] průřezu vzorku. Jelikož skutečná okamžitá plocha průřezu bude vždy menší než počáteční plocha průřezu  $S_0$  [mm<sup>2</sup>], bude skutečné napětí  $\sigma_s$  (rovnice 5.3) vždy větší než smluvní napětí  $\sigma$ . Podobným způsobem lze zpřesnit popis deformace formou okamžitého neboli logaritmického poměrného prodloužení  $\varepsilon_s$  (rovnice 5.5). Skutečný diagram zkoušky tahem popisuje závislost mezi skutečným napětím a logaritmickým poměrným prodloužením.

[56] [64] [67]

$$\sigma_s = \frac{F}{S} \quad , \quad (5.3)$$

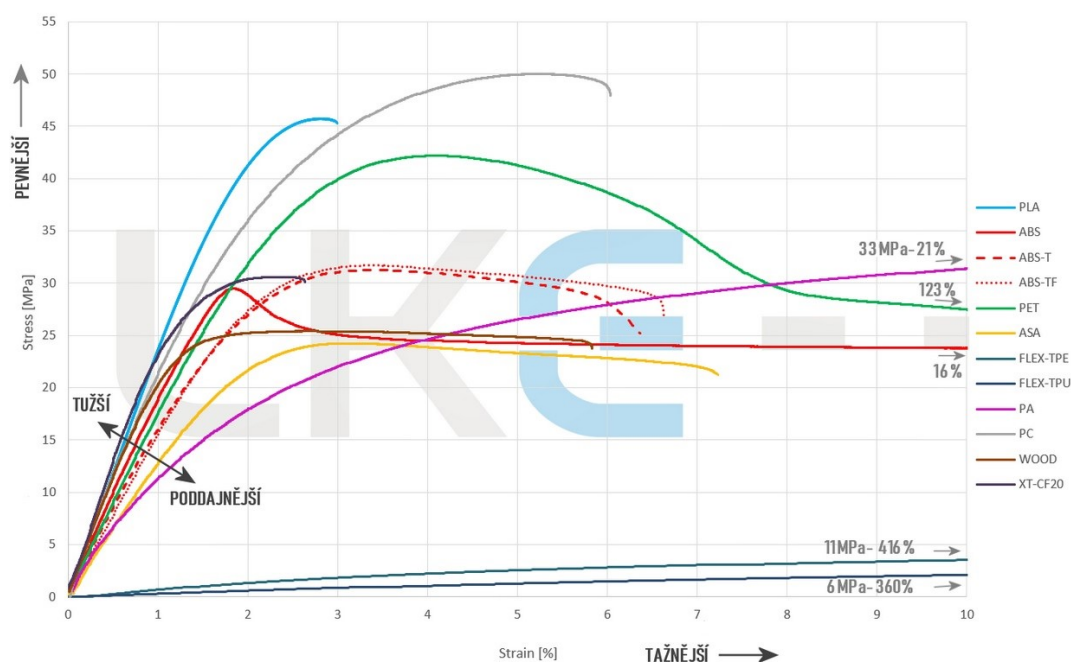
$$\sigma_s = \sigma \cdot (1 + \varepsilon) \quad , \quad (5.4)$$

$$\varepsilon_s = \ln(1 + \varepsilon) \quad , \quad (5.5)$$

kde

- $\sigma_s$  [MPa] je skutečné napětí,
- $F$  [N] je osová síla,
- $S$  [mm<sup>2</sup>] je okamžitá plocha průřezu zkušebního vzorku,
- $\sigma$  [MPa] je smluvní napětí,
- $\varepsilon_s$  [1] je logaritmické poměrné prodloužení,
- $\varepsilon$  [1] je poměrné podélné prodloužení.

Na obrázku 5.3 můžeme vidět smluvní diagram nejčastěji používaných plastů v technologii 3D tisku. Zkušebními vzorky jednotlivých materiálů jsou tyče obdélníkového průřezu vytištěné technologií FDM.



Obrázek 5.3 – Smluvní diagram tahových zkoušek plastů využívaných k 3D tisku [68]

### 5.3 Parametry získané z tahové zkoušky

Z tahové zkoušky a diagramů lze získat následující materiálové parametry.

#### 5.3.1 Mez kluzu $R_e$

Jedná se o hranici lineární závislosti napětí na poměrném prodloužení, kdy se mění elastická deformace na plastickou deformaci. Je to tedy napětí, při kterém dochází k prvním trvalým deformacím zkušební tyče. Hodnota meze kluzu  $R_e$  je určena vztahem

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} \quad , \quad (5.6)$$

kde

- $R_e$  [MPa] je mez kluzu,
- $F_e$  [N] je zatížení při mezi kluzu,
- $S_0$  [mm<sup>2</sup>] je počáteční plocha průřezu zkušební tyče.

#### 5.3.2 Mez pevnosti $R_m$

Jedná se o maximální smluvní napětí v tahu, které odpovídá největší síle  $F_{max}$  před přetržením vzorku. Hodnota meze pevnosti  $R_m$  je určena vztahem

$$R_m = \frac{F_{max}}{S_0} \quad , \quad (5.7)$$

kde

- $R_m$  [MPa] je mez pevnosti,
- $F_{max}$  [N] je maximální osová síla,
- $S_0$  [mm<sup>2</sup>] je počáteční plocha průřezu zkušební tyče.

#### 5.3.3 Kontrakce $Z$

Kontrakce vyjadřuje zmenšení průřezu vzorku po přetržení. Měření plochy průřezu probíhá v místě vzniklého lomu. Hodnota kontrakce  $Z$  je určena vztahem

$$Z = \frac{\Delta S}{S_0} \cdot 100 \quad , \quad (5.8)$$

$$Z = \frac{S_0 - S_1}{S_0} \cdot 100 \quad , \quad (5.9)$$

kde

- $Z$  [%] je kontrakce,
- $\Delta S$  [mm<sup>2</sup>] je rozdíl ploch počátečního a vzniklého průřezu,
- $S_0$  [mm<sup>2</sup>] je počáteční plocha průřezu zkušební tyče,
- $S_1$  [mm<sup>2</sup>] je konečná plocha průřezu zkušební tyče.

### 5.3.4 Poměrné prodloužení – Tažnost $A$

Tažnost vyjadřuje podélnou deformaci. Hodnota tažnosti je určena vztahem

$$A = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot 100 \quad , \quad (5.10)$$

$$A = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \cdot 100 \quad , \quad (5.11)$$

kde

- $A$  [%] je tažnost
- $\Delta l$  [mm] je rozdíl počáteční a konečné délky vzorku,
- $l_0$  [mm] je počáteční měřená délka zkušební vzorku,
- $l_1$  [mm] je konečná měřená délka zkušební vzorku.

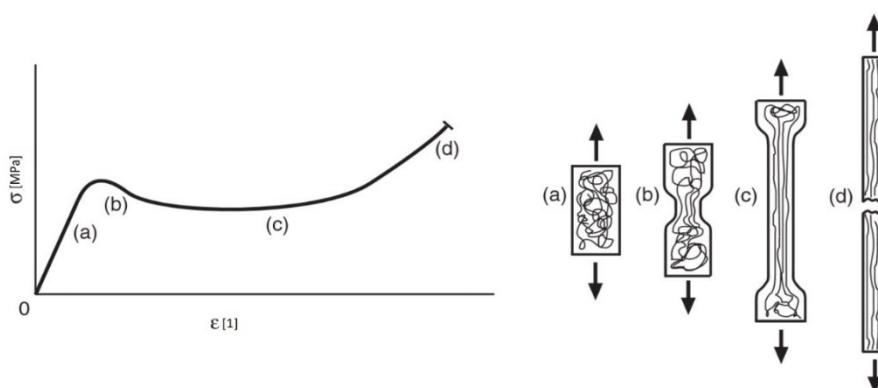
### 5.3.5 Modul pružnosti $E$

Počáteční část deformační křivky vykazuje lineární závislost. Hodnota modulu pružnosti  $E$  [MPa], také nazýván Youngův modul, se určuje z diagramu v oblasti lineární závislosti napětí na poměrném prodloužení. V této oblasti platí Hookův zákon, který říká, že deformace je přímo úměrná napětí materiálu.

Hodnotu modulu pružnosti  $E$  lze vyjádřit pomocí napětí a poměrného prodloužení ve dvou bodech A a B na deformační křivce tahového diagramu v oblasti lineární závislosti. [69]

$$E = \frac{\sigma_B - \sigma_A}{\varepsilon_B - \varepsilon_A} \quad (5.12)$$

Na obrázku 5.4 můžeme vidět ukázkou deformační křivky včetně změny rozměrů zkoušeného vzorku při tahové zkoušce.



Obrázek 5.4 – Deformační křivka a změna rozměrů zkoušených vzorků [69]

## 6 Analýza mechanických vlastností materiálu PA11

### 6.1 Materiál PA11

Materiál PA11 je polyamid přírodního původu, který je získáván z obnovitelných zdrojů (ricinový olej). Jedná se o všestranně použitelný materiál, který se v široké míře využívá pro náročné aplikace vyžadující vlastnosti jako je chemická, tepelná nebo mechanická odolnost. V tabulce 6.1 níže můžeme vidět parametry materiálu uváděné výrobcem. [70]

Tabulka 6.1 – Mechanické vlastnosti materiálu PA11 uváděné výrobcem [71]

Kategorie	Měřený parametr	Hodnota
Všeobecné vlastnosti	Teplota tání práškového materiálu (měřeno pomocí DSC)	202 °C
	Velikost částic	50 µm
	Objemová hmotnost práškového materiálu	0,48 g/cm <sup>3</sup>
	Hustota	1,04 g/cm <sup>3</sup>
Mechanické vlastnosti	Pevnost v tahu, maximální zatížení XY	50 MPa
	Pevnost v tahu, maximální zatížení Z	50 MPa
	Modul pružnosti v tahu XY	1800 MPa
	Modul pružnosti v tahu Z	1800 MPa
	Prodloužení při přetržení XYZ	50 %
	Pevnost v ohybu (při 5 %) XY	60 MPa
	Pevnost v ohybu (při 5 %) Z	60 MPa
	Modul pružnosti v ohybu XY	1600 MPa
	Modul pružnosti v ohybu Z	1600 MPa
	Vrubová houževnatost (zkouška metodou Izod, 3,2 mm, 23 °C), XYZ	6 kJ/m <sup>2</sup>
Teplotní vlastnosti	Teplotní deformace (při tlaku 0,45 MPa), Z	183 °C
	Teplotní deformace (při tlaku 1,82 MPa), Z	50 °C
Opětovná využitelnost	Podíl nového materiálu pro zajištění stabilní kvality tisku	30 %

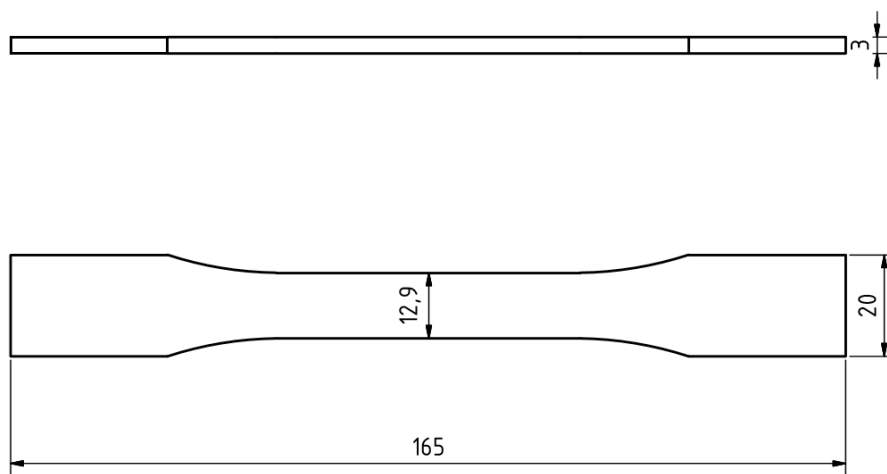
Vzhledem k pružnosti a odolnosti materiálu je PA11 používán k výrobě ortopedických pomůcek. Příkladem může být výroba personalizovaných produktů kombinací 3D skenováním, 3D tisku a specializovaného softwaru. Tuto technologii například využívá firma Invent Medical. Jelikož jsou lidské končetiny většinu času v pohybu a současně se ohýbají a natáčí, musí také materiál odolávat smršťování a roztahování ortézy. Materiál PA11 umožňuje výrobu velmi tenkého, na pohmat příjemného a velmi pružného produktu schopného současně snést velký tlak. Technologie 3D tisku materiálu PA11 je využívána k výrobě produktů se složitou geometrií, které není dosud možné vyrobit jinou technologií při zachování stejných mechanických vlastností a rychlosti výroby. [72]

## 6.2 Vzorky pro zkoušení

Zkušební vzorky z materiálu PA11 byly vytištěny technologií HP Multi Jet Fusion (kapitola 3.5) tiskárnou HP Jet Fusion 4200.

### 6.2.1 Rozměry vzorků

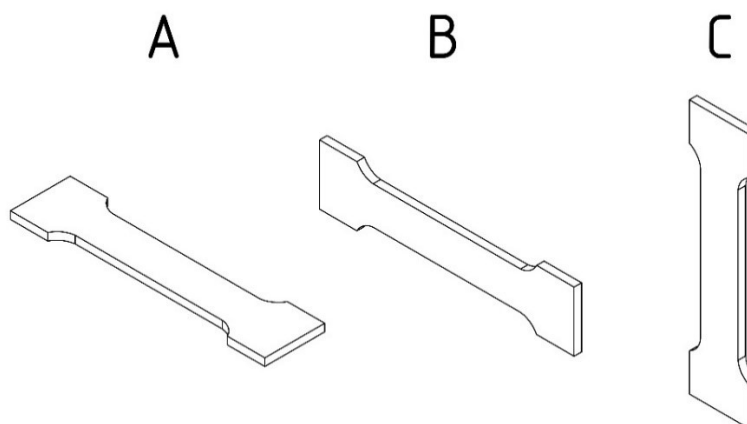
Ke zkoušení bylo vybráno 9 zkušebních vzorků obdélníkového průřezu (obrázek 6.1). Vzorky mají tvar oboustranných lopatek, který je vhodný k upnutí do čelistí trhacího stroje.



Obrázek 6.1 – Rozměry zkušebních vzorků

### 6.2.2 Poloha při tisku

K testování byly vytištěny 3 sady vzorků (označené A, B a C) po 3 kusech. Sady vzorků jsou navrženy tak, aby mohl být posouzen vliv orientace součásti během tisku na mechanické vlastnosti. Orientace vzorků během tisku vyplývá z obr. 6.2.



Obrázek 6.2 – Orientace vzorků při tisku



### 6.3 Průběh tahové zkoušky

Tahová zkouška probíhala na dvousloupovém, počítačem řízeném univerzálním zkušebním stroji pro zkoušky materiálů TESTOMETRIC M500 – 50CT. Před zkouškou je nutno nadefinovat tvar a rozměry vzorku.



Obrázek 6.3 – Univerzální zkušební stroj TESTOMETRIC M500 – 50CT

Pro lepší přehlednost byly vzorky před začátkem zkoušky označeny podle polohy při tisku (A, B, C) a v každé skupině byl vzorek označen číslem 1–3. Horní strana vzorů je označena písmenem T a dolní strana vzorků písmenem B.



Obrázek 6.4 – Zkušební vzorky na tahovou zkoušku materiálu PA11

Dalším krokem před začátkem tahové zkoušky je změření šířky ( $b$ ) a výšky ( $h$ ) vzorků, z důvodu přepočtu zatěžující síly na napětí. Každý vzorek byl změřen ve 3 místech, ze kterých byla vypočtena průměrná hodnota. Naměřené a zprůměrované hodnoty rozměrů jsou uvedeny v tabulce 6.2–6.7. Měřené vzorky vykazovaly soudkovitost.

Tabulka 6.2 – Naměřené rozměry vzorků A

<b>A1</b>		<b>A2</b>		<b>A3</b>	
Šířka $b$ [mm]	Výška $h$ [mm]	Šířka $b$ [mm]	Výška $h$ [mm]	Šířka $b$ [mm]	Výška $h$ [mm]
13,35	3,48	13,03	3,2	13,06	3,23
13,08	3,40	13,13	3,21	13,04	3,22
13,06	3,43	13,13	3,22	13,02	3,20

Tabulka 6.3 – Zprůměrované rozměry vzorků A

Průměrné hodnoty					
<b>A1</b>		<b>A2</b>		<b>A3</b>	
Šířka $b$ [mm]	Výška $h$ [mm]	Šířka $b$ [mm]	Výška $h$ [mm]	Šířka $b$ [mm]	Výška $h$ [mm]
13,16	3,44	13,10	3,21	13,04	3,22

Tabulka 6.4 – Naměřené rozměry vzorků B

<b>B1</b>		<b>B2</b>		<b>B3</b>	
Šířka $b$ [mm]	Výška $h$ [mm]	Šířka $b$ [mm]	Výška $h$ [mm]	Šířka $b$ [mm]	Výška $h$ [mm]
13,29	3,23	13,23	3,39	13,36	3,36
13,26	3,26	13,26	3,40	13,32	3,34
13,23	3,29	13,21	3,42	13,29	3,33

Tabulka 6.5 – Zprůměrované rozměry vzorků B

Průměrné hodnoty					
<b>B1</b>		<b>B2</b>		<b>B3</b>	
Šířka $b$ [mm]	Výška $h$ [mm]	Šířka $b$ [mm]	Výška $h$ [mm]	Šířka $b$ [mm]	Výška $h$ [mm]
13,26	3,26	13,23	3,40	13,32	3,34

Tabulka 6.6 – Naměřené rozměry vzorků C

<b>C1</b>		<b>C2</b>		<b>C3</b>	
Šířka $b$ [mm]	Výška $h$ [mm]	Šířka $b$ [mm]	Výška $h$ [mm]	Šířka $b$ [mm]	Výška $h$ [mm]
13,16	3,31	13,09	3,23	13,18	3,34
13,12	3,29	13,07	3,26	13,18	3,35
13,16	3,32	13,09	3,29	13,12	3,36

Tabulka 6.7 – Zprůměrované rozměry vzorků C

Průměrné hodnoty					
A1		A2		A3	
Šířka $b$ [mm]	Výška $h$ [mm]	Šířka $b$ [mm]	Výška $h$ [mm]	Šířka $b$ [mm]	Výška $h$ [mm]
13,15	3,31	13,08	3,26	13,16	3,35

Z naměřených hodnot rozměrů je spočítána počáteční plocha průřezu  $S_0$  [mm<sup>2</sup>] jednotlivých vzorků podle vztahu

$$S_0 = b \cdot h \quad , \quad (6.1)$$

kde

- $b$  [mm] je šířka vzorku,
- $h$  [mm] je výška vzorku.

Vypočítané hodnoty jednotlivých ploch průřezů nalezneme v tabulce 6.8 níže.

Tabulka 6.8 – Plocha průřezu vzorků A, B, C

Plocha průřezů $S_0$ [mm <sup>2</sup> ]		
A1	A2	A3
45,24	42,04	41,95
B1	B2	B3
43,23	45,04	44,54
C1	C2	C3
43,47	42,65	44,09

Po označení a změření vzorků je stroj nastaven do výchozí polohy. Před zkouškou je nutno nadefinovat tvar, rozměry vzorku a rychlost zatěžování. Rychlost zatěžování (posunu příčnicku) byla zvolena 10 mm/min.

Následně je vzorek důkladně upevněn mezi upínací čelisti. Je důležité vzorek upnout tak, aby se zamezilo vychýlení a přidavným ohybovým momentům. Následně byl připevněn extenzometr, který snímá přetvoření.

Dalším krokem je spuštění samotné tahové zkoušky v ovládacím softwaru. Během procesu zatěžování vzorku tahem byl v softwaru počítače vykreslován průběh tahové zkoušky v podobě křivky závislosti síly  $F$  [N] na prodloužení  $\Delta l$  [mm]. Po přetržení vzorku se celý proces automaticky zastavil, části přetrženého vzorku byly vyňaty, naměřená data uložena a začal proces měření dalšího vzorku. Naměřená data v rámci jedné série vzorků byla exportována do softwaru Excel a následně v Excelu zpracována. Takto proběhla tahová zkouška všech vzorků.

Na obrázku 6.5 jsou zachyceny vzorky po tahové zkoušce.



Obrázek 6.5 – Zkušební vzorky materiálu PA11 po tahové zkoušce

#### 6.4 Zpracování naměřených dat

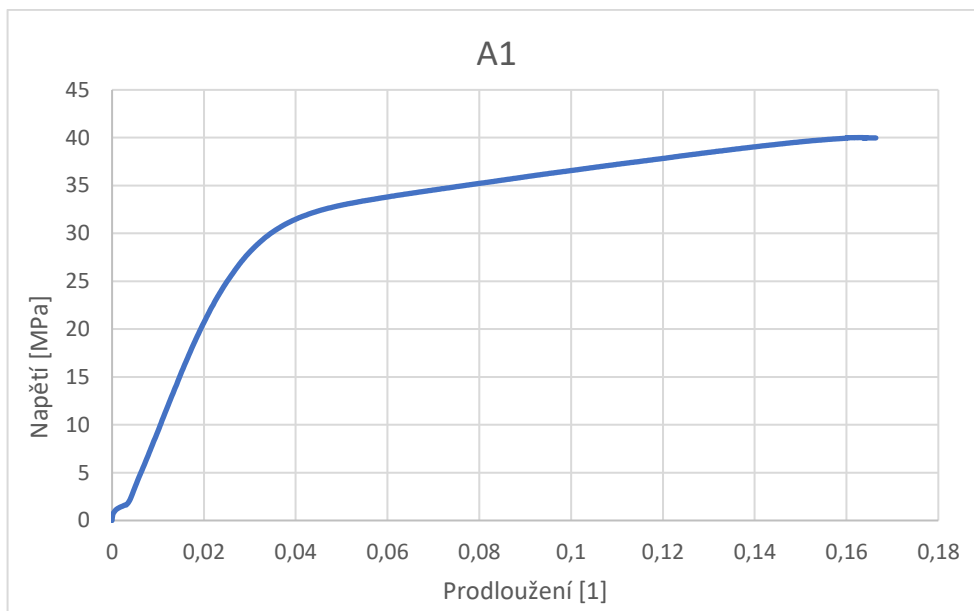
Vyhodnocování dat proběhlo ve softwaru Excel, kam byla naměřená data exportována přímo ze softwaru připojeného ke zkušebnímu stroji. Exportovaný soubor obsahuje hodnoty síly  $F$  [N], kterou je zkušební vzorek namáhán na tah a prodloužení  $\Delta l$  [mm]. Maximální hodnoty zatěžující síly a prodloužení jsou vypsány v tabulce 6.9.

Tabulka 6.9 – Maximální hodnoty zatěžující síly a poměrného prodloužení

vzorek	maximální zatěžující síla $F_{max}$ [N]	maximální prodloužení $\Delta l$ [mm]
<b>A1</b>	1810,10	4,16
<b>A2</b>	1973,80	5,90
<b>A3</b>	1801,50	4,55
průměr	<b>1861,80</b>	<b>4,87</b>
<b>B1</b>	2101,50	9,17
<b>B2</b>	2100,10	8,90
<b>B3</b>	2088,00	8,34
průměr	<b>2096,53</b>	<b>8,80</b>
<b>C1</b>	2223,90	6,72
<b>C2</b>	2242,00	6,17
<b>C3</b>	2203,60	8,25
průměr	<b>2223,17</b>	<b>7,05</b>

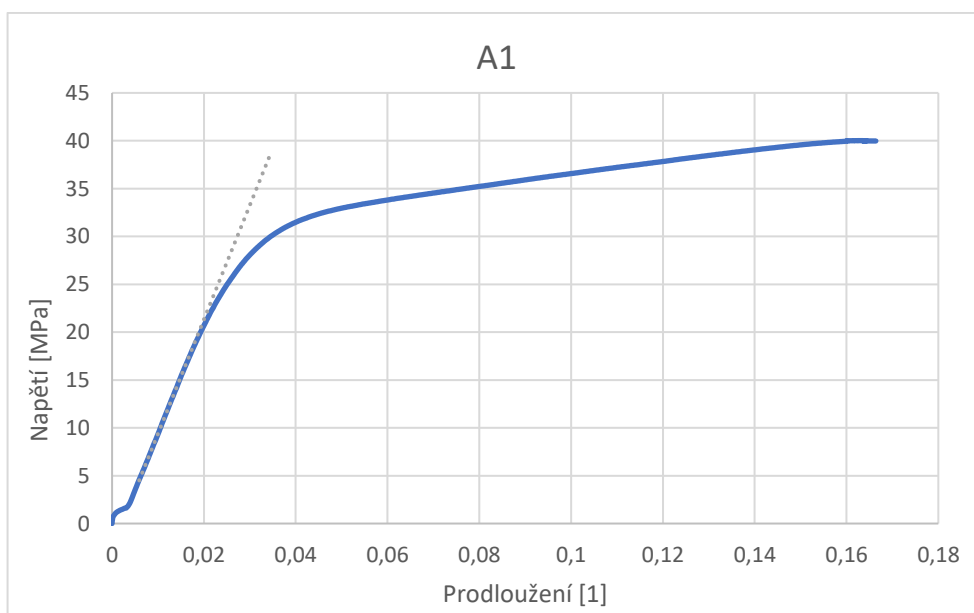
#### 6.4.1 Zpracování naměřených dat pro vzorek A1

První krok zpracování naměřených dat je výpočet smluvního napětí  $\sigma$  podle vztahu (5.1) a poměrného prodloužení  $\varepsilon$  podle vztahu (5.2). Poté je možné sestavit smluvní diagram tahové zkoušky vyjadřující závislost smluvního napětí a poměrného prodloužení. Na obrázku 6.6 lze pozorovat smluvní diagram pro vzorek A1.



Obrázek 6.6 – Smluvní diagram pro vzorek A1

Po proložení diagramu přímkou (obrázek 6.7) v oblasti elastické deformace je odečtena mez kluzu  $R_e = 21$  MPa.



Obrázek 6.7 – Smluvní diagram pro vzorek A1 proložený přímkou

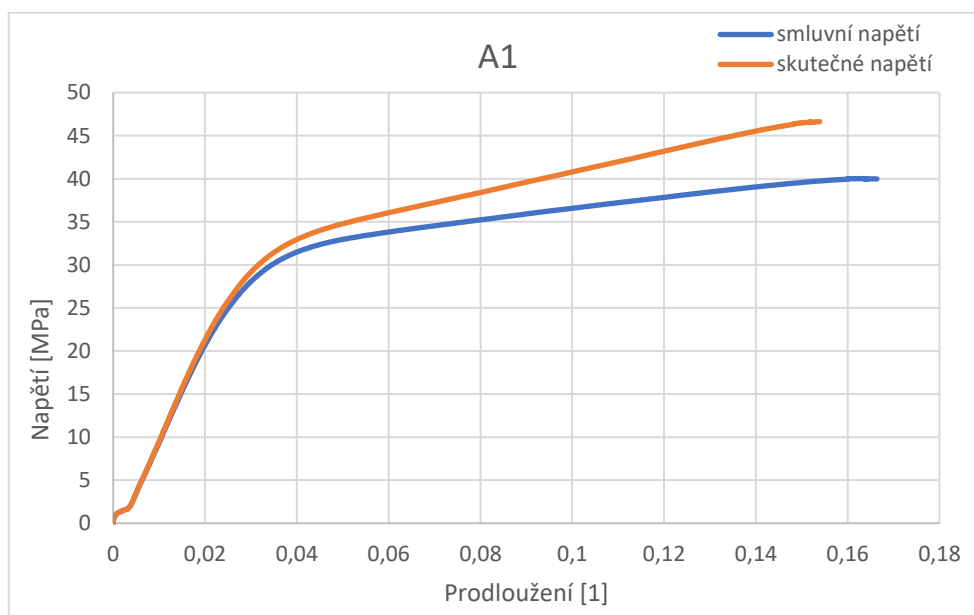
Mez pevnosti  $R_m$  je vypočtena ze vztahu

$$R_m = \frac{F_{max}}{S_0} , \quad (6.2)$$

$$R_m = \frac{1810,10}{45,24} , \quad (6.3)$$

$$R_m = 40,01 \text{ MPa} . \quad (6.4)$$

Dalším krokem je vytvoření skutečného diagramu tahové zkoušky, tedy vytvoření křivky závislosti skutečného napětí (rovnice 5.4) na logaritmické poměrné deformaci (rovnice 5.5). Na obrázku 6.8 lze pozorovat srovnání smluvního a skutečného diagramu tahové zkoušky zkušební vzorku A1.



Obrázek 6.8 – Smluvní diagram a skutečný diagram vzorku A1

Dalším parametrem, který je důležitý k pevnostní kontrole, je Youngův modul pružnosti  $E$ . Ten je možné vypočítat více způsoby, například pomocí dvou bodů na deformační křivce v oblasti elastických deformací

$$E = \frac{\sigma_B - \sigma_A}{\varepsilon_B - \varepsilon_A} , \quad (6.5)$$

$$E = \frac{18,4159 - 4,5864}{0,0178 - 0,0059} , \quad (6.6)$$

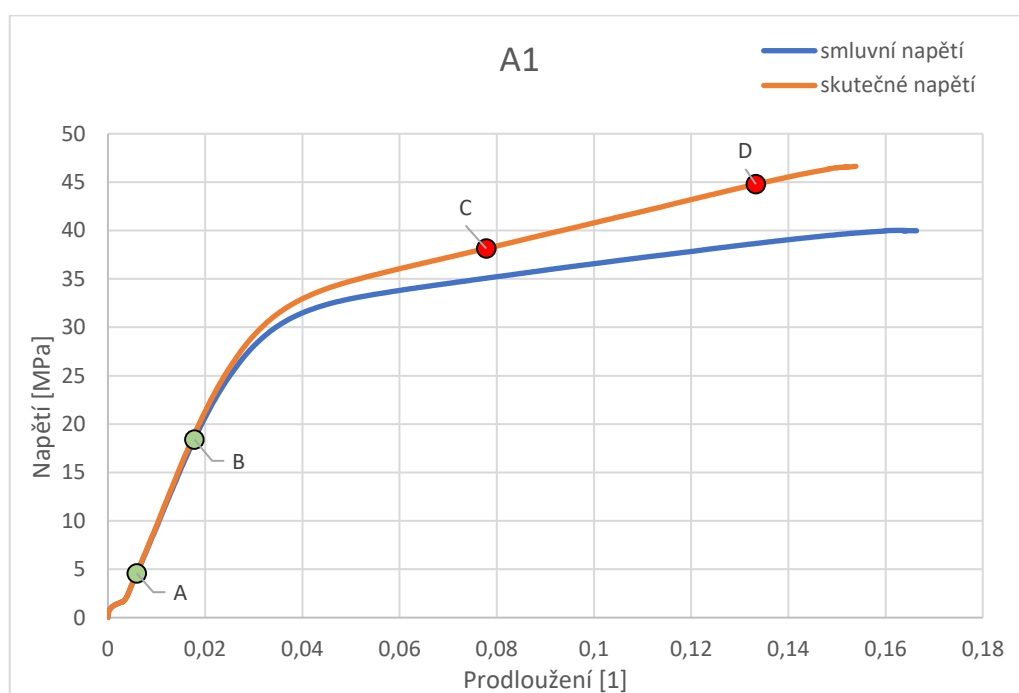
$$E = 1162 \text{ MPa} . \quad (6.7)$$

K popisu napětově-deformačního chování v oblasti plastických deformací (po překročení meze kluzu) je možné použít několik materiálových modelů, které se od sebe liší chováním modelu při opakovaném zatěžování. Při modelování napětově-deformačního chování ortopedické pomůcky bude použit bilineární materiálový model, kdy je křivka skutečného diagramu nahrazena lomenou přímkou, skládající se z pružné a plastické části. K definování bilineárního modelu ve výpočetním programu Ansys je potřeba zadat mez kluzu  $R_e$  a tečný modul  $E_t$ , který je vypočítán podle vztahu

$$E_t = \frac{\sigma_D - \sigma_C}{\varepsilon_D - \varepsilon_C} \quad , \quad (6.8)$$

$$E_t = \frac{44,7846 - 38,1382}{0,1333 - 0,0778} \quad , \quad (6.9)$$

$$E_t = 120 \text{ MPa} \quad . \quad (6.10)$$



Obrázek 6.9 – Diagram s vyznačenými hodnotami pro výpočet modulů



#### 6.4.2 Výsledné materiálové parametry pro zkušební vzorky

Parametry všech vzorků jsou zapsány v následujících tabulkách (6.10-6.12):

Tabulka 6.10 – Hodnoty meze pevnosti a meze kluzu

vzorek	mez pevnosti $R_m$ [MPa]	mez kluzu $R_e$ [MPa]
A1	40,01	21
A2	46,95	24
A3	42,95	21
<b>průměr</b>	<b>43,30</b>	<b>22</b>
B1	48,61	27
B2	50,87	25
B3	46,87	23
<b>průměr</b>	<b>48,79</b>	<b>25</b>
C1	51,16	25
C2	52,57	30
C3	49,98	28
<b>průměr</b>	<b>51,24</b>	<b>27,7</b>

Tabulka 6.11 – Hodnoty maximálního skutečného napětí a logaritmického prodloužení

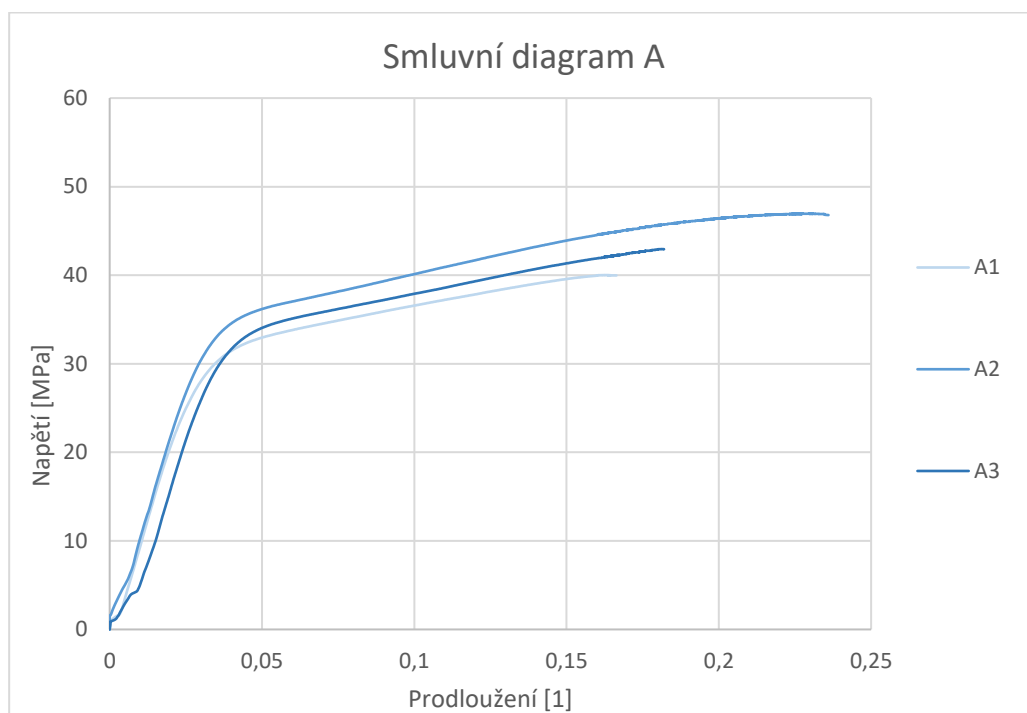
vzorek	maximální skutečné napětí [MPa]	maximální log. prodloužení [1]
A1	46,63	0,15
A2	57,91	0,21
A3	50,76	0,17
<b>průměr</b>	<b>51,76</b>	<b>0,18</b>
B1	64,65	0,31
B2	67,94	0,30
B3	61,06	0,29
<b>průměr</b>	<b>64,55</b>	<b>0,30</b>
C1	63,64	0,24
C2	64,82	0,22
C3	64,28	0,29
<b>průměr</b>	<b>64,25</b>	<b>0,25</b>

Tabulka 6.12 – Hodnoty Youngova modulu a tečného modulu

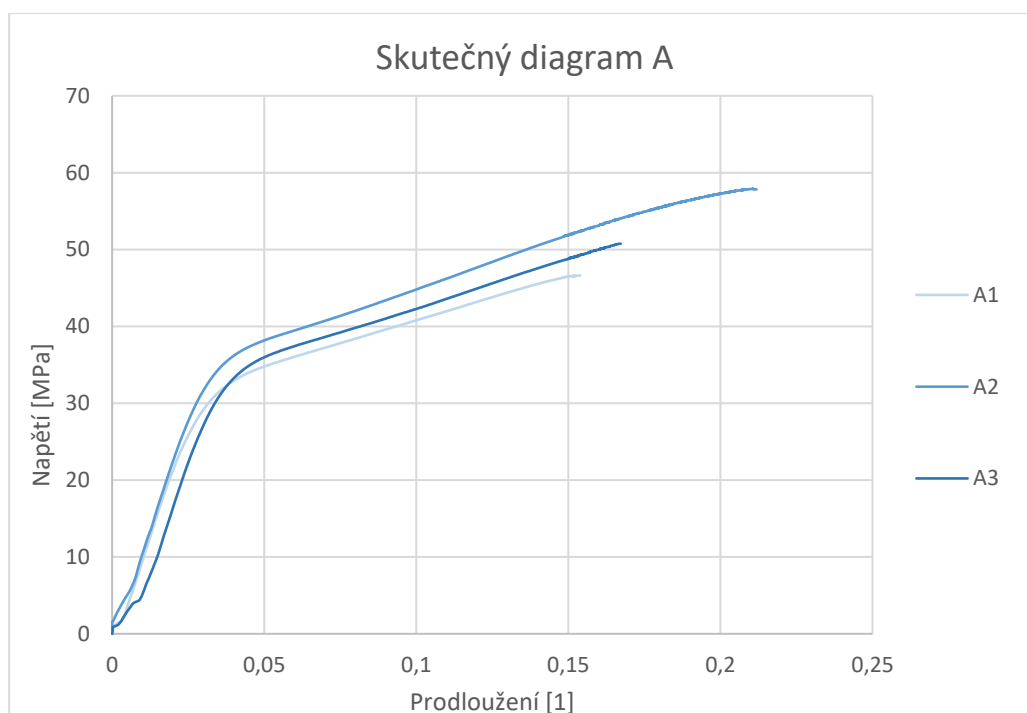
vzorek	Youngův modul $E$ [MPa]	Tečný modul $E_t$ [MPa]
A1	1162	120
A2	1157	128
A3	1138	128
<b>průměr</b>	<b>1152</b>	<b>125</b>
B1	1177	114
B2	1406	110
B3	1321	117
<b>průměr</b>	<b>1301</b>	<b>114</b>
C1	1554	130
C2	1362	134
C3	1389	134
<b>průměr</b>	<b>1435</b>	<b>133</b>

### 6.4.3 Smluvní a skutečné diagramy vzorků A, B, C

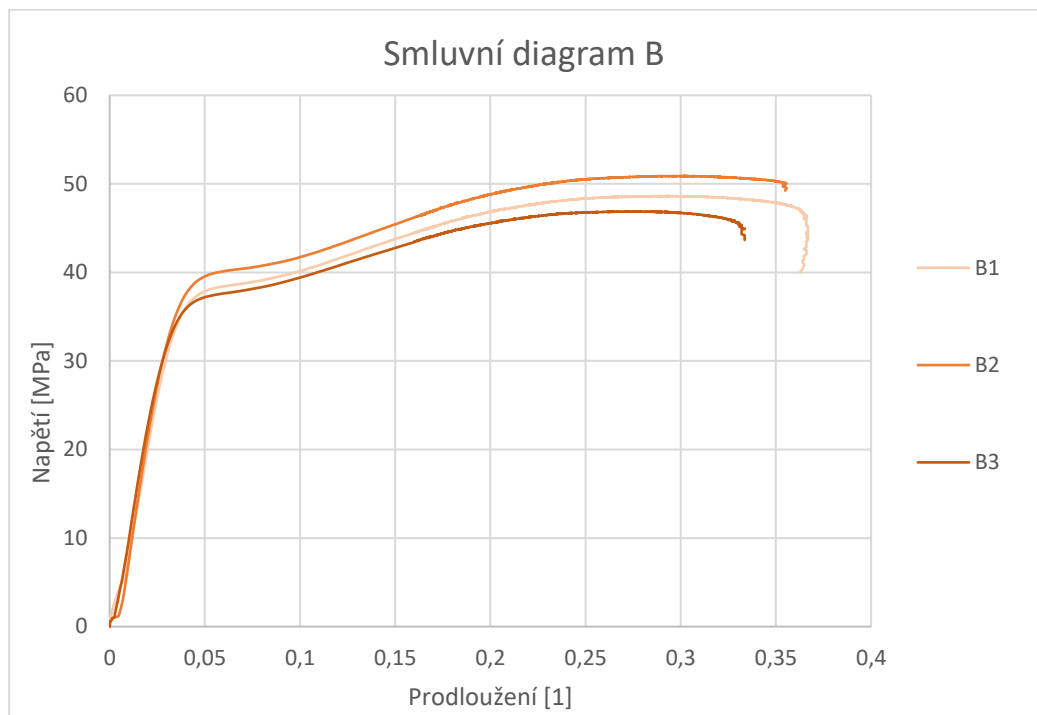
Na následujících diagramech lze pozorovat napětově-deformační křivky vzorků A, B a C.



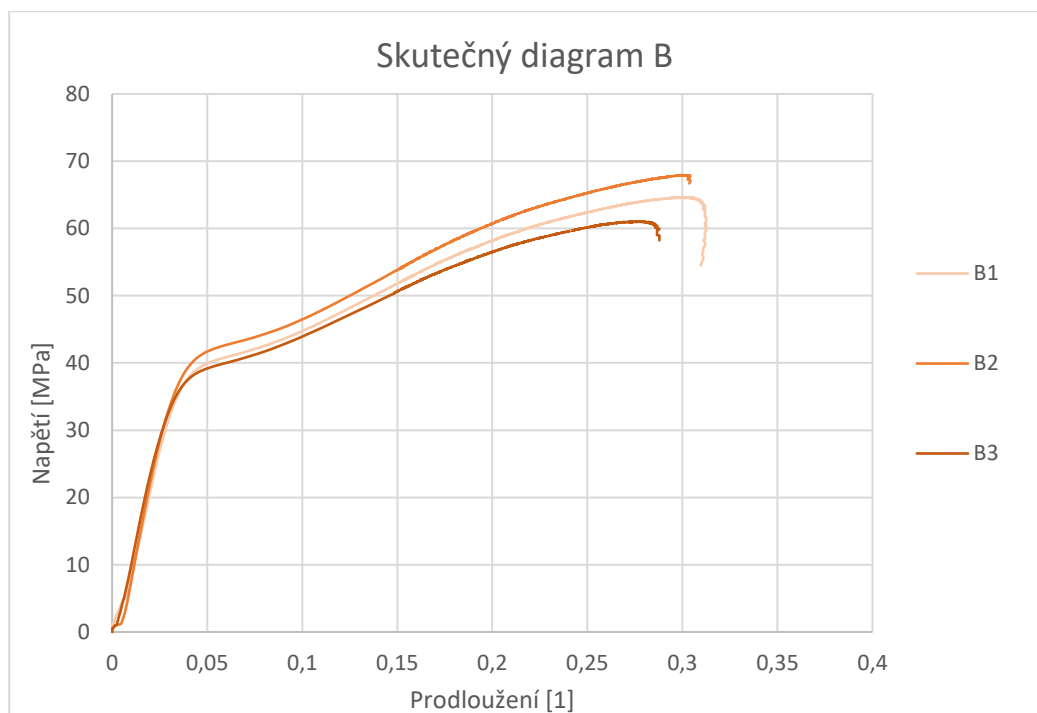
Obrázek 6.10 – Smluvní diagram vzorů A1, A2 a A3



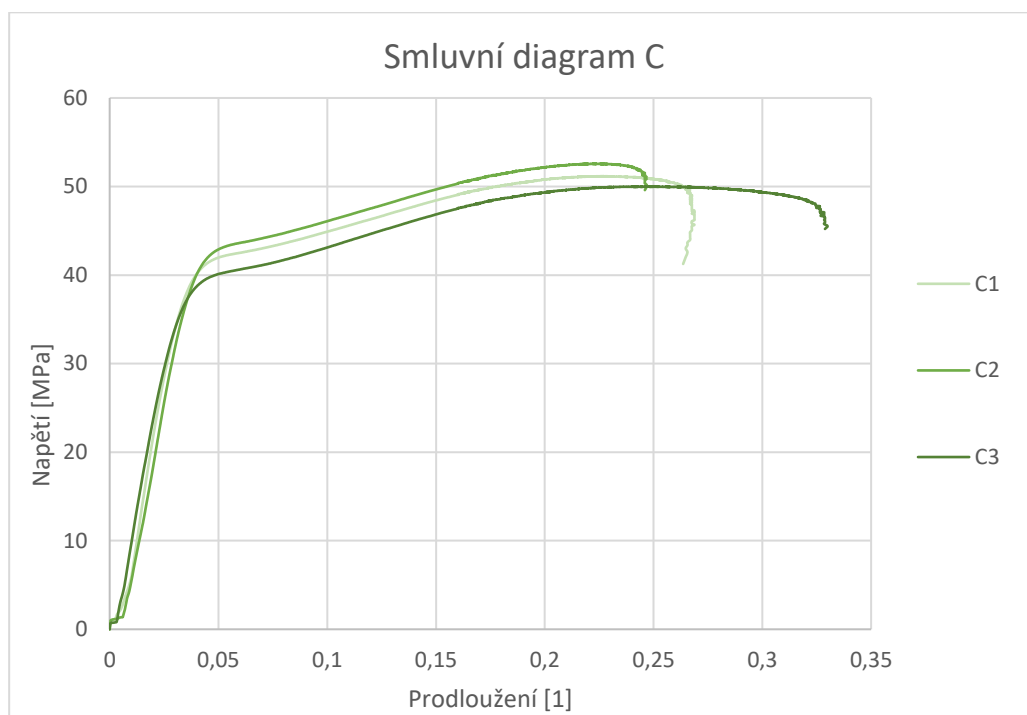
Obrázek 6.11 – Skutečný diagram vzorů A1, A2 a A3



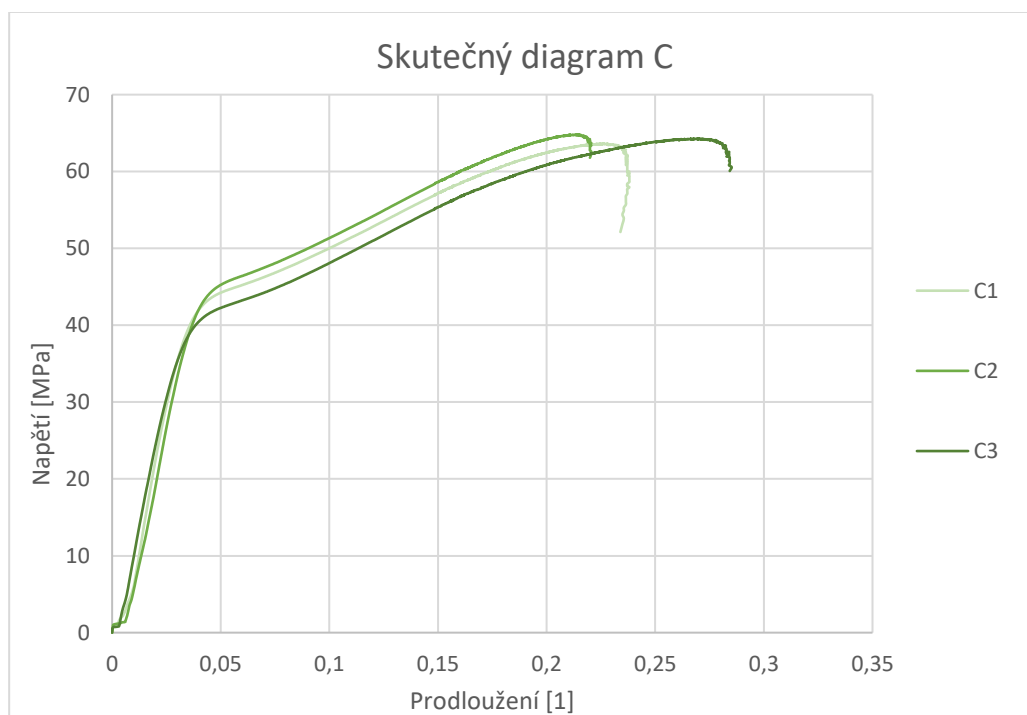
Obrázek 6.12 – Smluvní diagram vzorů B1, B2 a B3



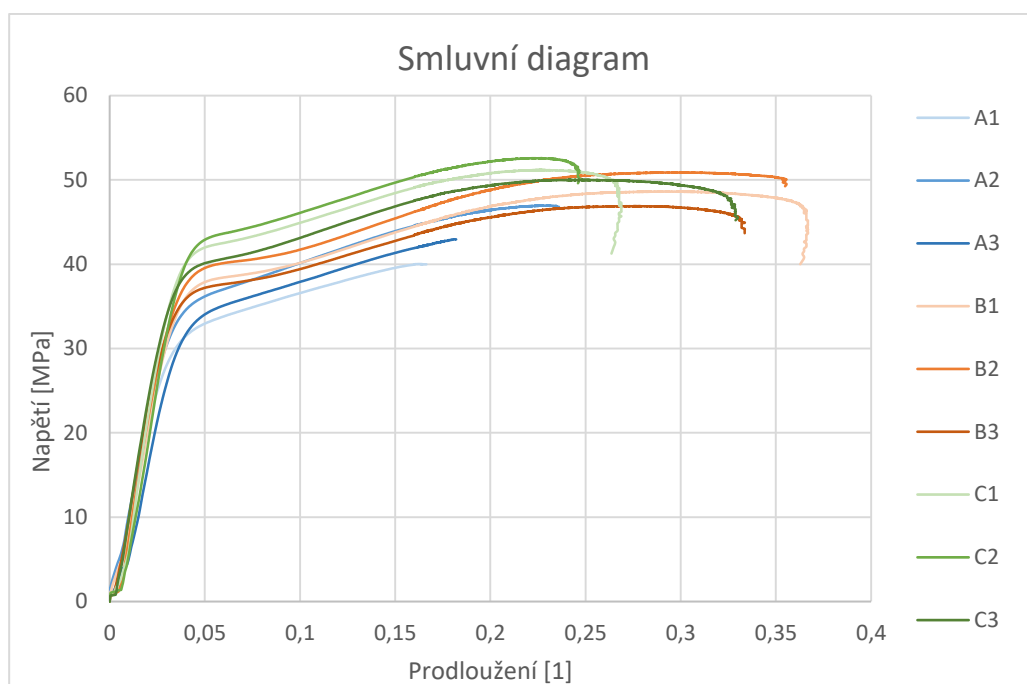
Obrázek 6.13 – Skutečný diagram vzorů B1, B2 a B3



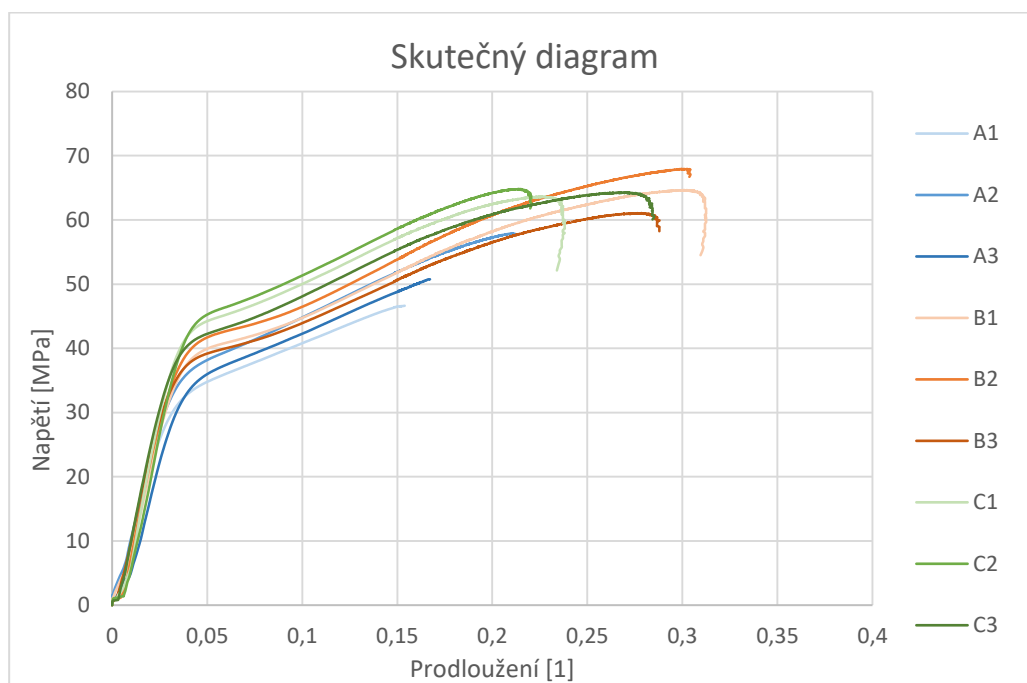
Obrázek 6.14 – Smluvní diagram vzorů C1, C2 a C3



Obrázek 6.15 – Skutečný diagram vzorů C1, C2 a C3



Obrázek 6.16 – Srovnání smluvních diagramů vzorků A, B, C



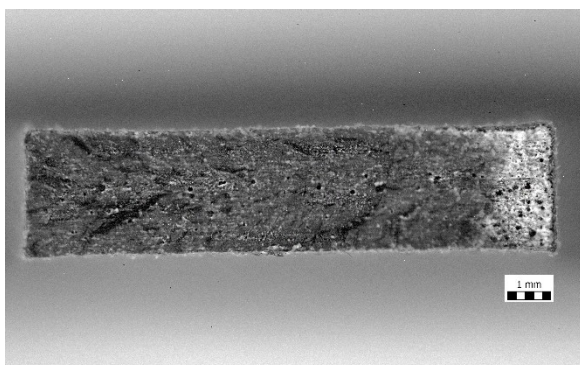
Obrázek 6.17 – Srovnání skutečných diagramů vzorků A, B, C

## 6.5 Hodnocení struktury lomové plochy

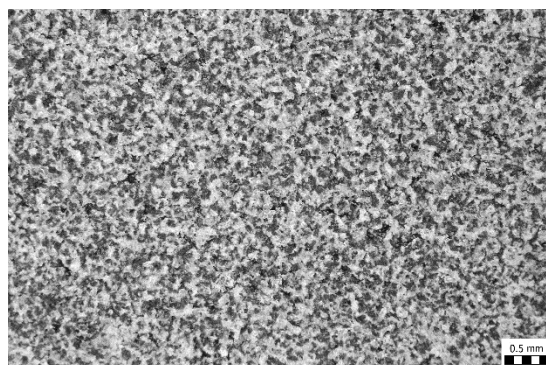
Ke zjištění kvality 3D tisku testovaných vzorků a spojení částic materiálu byly vzorky pozorovány pod mikroskopem. Snímky byly pořízeny na mikroskopu Olympus LEXT OLS5000.

Na obrázku 6.18 můžeme pozorovat lomovou plochu vzorku A1, kde lze vidět, že materiál není po celé ploše průřezu homogenní. To může ovlivnit mechanické vlastnosti výtisků. Na obrázku 6.20 a 6.21 můžeme vidět detailnější pohled na lomovou plochu průřezu.

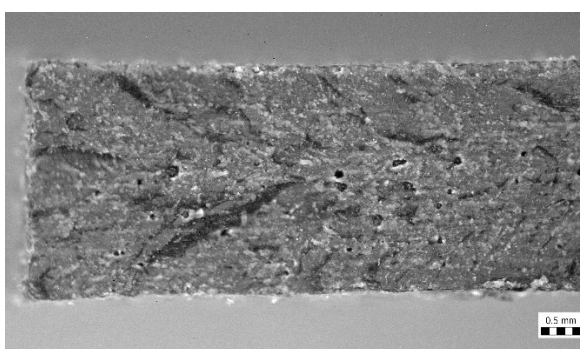
Při hodnocení makrostruktury byl u všech kontrolovaných vzorků pozorován výskyt pórů, které lze na snímcích lomových ploch vidět jako tmavé útvary, zejména kulatého tvaru. Póry jsou uspořádány nahodile. Výskyt pórů taktéž ovlivňuje mechanické vlastnosti výtisků a způsobuje nesrovnalosti mezi tabulkovými hodnotami a naměřenými výsledky. Přítomnost pórů může například způsobit snížení nosného průřezu vzorku, nebo pokud mají póry ostré hrany, mohou působit jako koncentrátoři napětí.



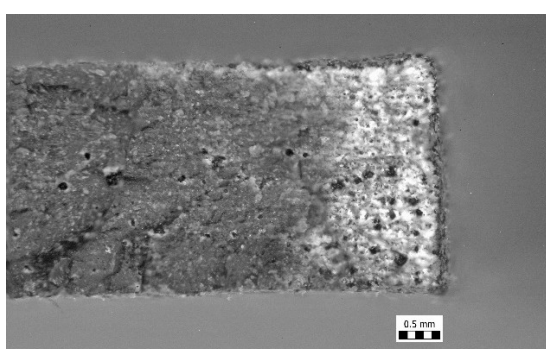
Obrázek 6.18 – Lomová plocha vzorku A1



Obrázek 6.19 – Vnější povrch vzorku A1



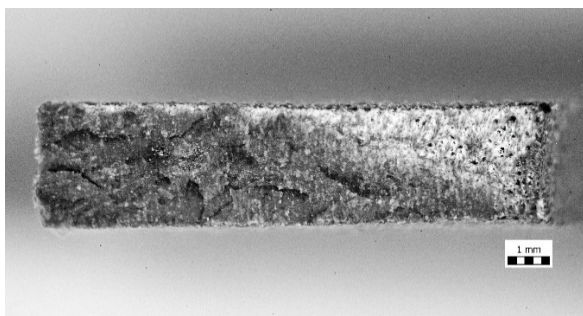
Obrázek 6.20 – Detail lomové plochy vzorku A1



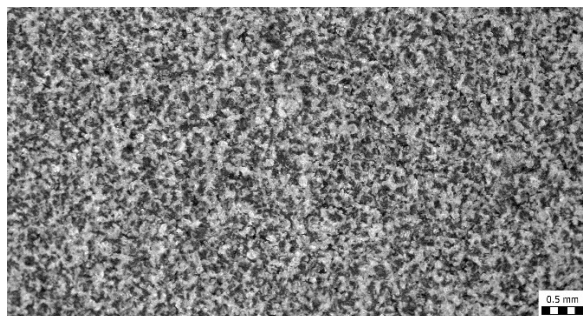
Obrázek 6.21 – Detail lomové plochy vzorku A1



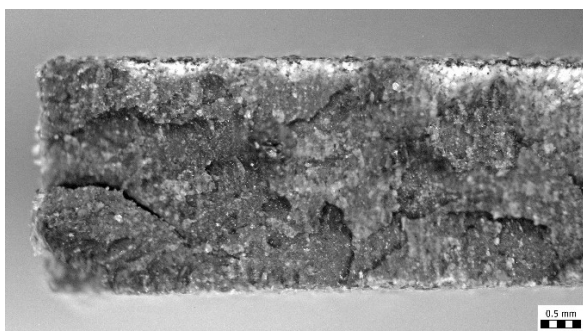
Na obrázcích 6.22 – 6.29 můžeme pozorovat strukturu vybraných vzorků B2 a C1.



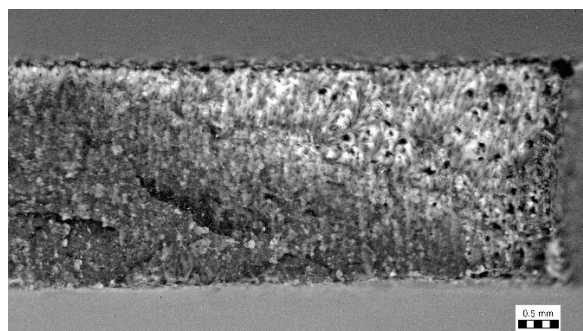
Obrázek 6.22 – Plocha průřezu vzorku B2



Obrázek 6.23 – Vnější povrch vzorku B2

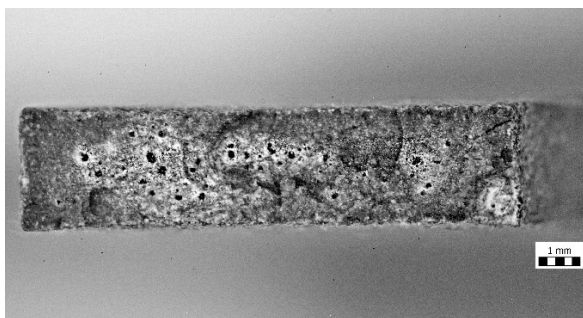


Obrázek 6.24 – Detail plochy průřezu vzorku B2

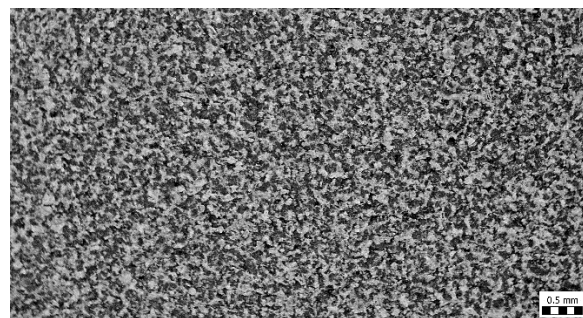


Obrázek 6.25 – Detail plochy průřezu vzorku B2

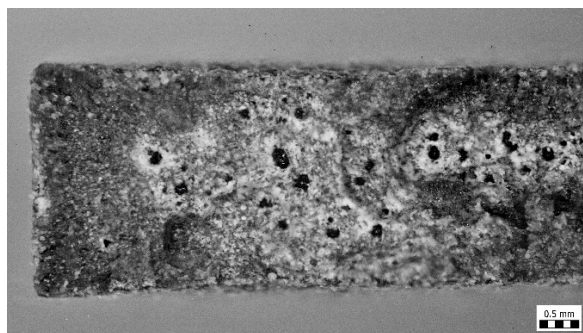
Zejména u vzorku C1 lze pozorovat velké množství pórů



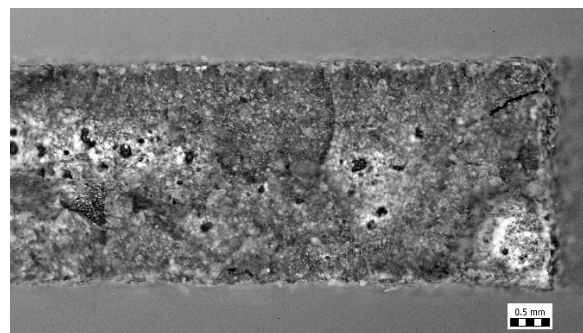
Obrázek 6.26 – Plocha průřezu vzorku C1



Obrázek 6.27 – Vnější povrch vzorku C1



Obrázek 6.28 – Detail plochy průřezu vzorku C1



Obrázek 6.29 – Detail plochy průřezu vzorku C1



## 7 Pevnostní analýza ortopedické pomůcky

Zjištěné materiálové vlastnosti jsou dále použity k pevnostní analýze ortopedické pomůcky Piro od firmy Invent Medical. Pevnostní analýza je provedena na základě dodaného geometrického modelu metodou konečných prvků (MKP) v programu ANSYS Workbench 2019 R1.

### 7.1 Ortopedická pomůcka Piro

Jedná se o kotníkovou ortézu pro děti typu AFO (Ankle-Foot Orthosis) a SMO (Supra Malleolar Orthosis), nejčastěji využívanou pro děti s dětskou mozkovou obrnou, která způsobuje poruchu hybnosti a vadné držení trupu nebo končetin. Ortéza zlepšuje kvalitu chůze, stabilitu, celkové držení těla, snižuje energetickou náročnost při pohybu dítěte a způsobuje korekci strukturálních deformit skrz ovlivnění správného postavení v hlezenním kloubu. Ortopedická pomůcka Piro od firmy Invent Medical využívá výhody 3D tisku. Ortéza vyniká svým příjemným vzhledem, je lehká a tenká, což je, zejména u dětských pacientů, velmi důležité. [73] [74] [75]



Obrázek 7.1 – Ortéza Piro [73]



Obrázek 7.2 – Ortéza Piro [73]

Firma Invent Medical nabízí 5 různých základních typů Piro ortéz, a to Active (SMO), Dynamic, Control, Block a Static. [73]



Obrázek 7.3 – Ortéza Piro Active SMO [73]



Obrázek 7.4 – Ortéza Piro Control [73]

## 7.2 Materiálové vlastnosti

K numerické analýze ortopedické pomůcky Piro jsou využity mechanické vlastnosti materiálu PA11 zjištěné z tahové zkoušky. Z hlediska bezpečnosti jsou využity nejnižší hodnoty z naměřených mechanických vlastností.

Tabulka 7.1 Materiálové vlastnosti polymeru PA11 zjištěné z tahové zkoušky

Mez kluzu $R_e$ [MPa]	21
Mez pevnosti $R_m$ [MPa]	40
Youngův modul $E$ [MPa]	1138
Tečný modul $E_t$ [MPa]	110

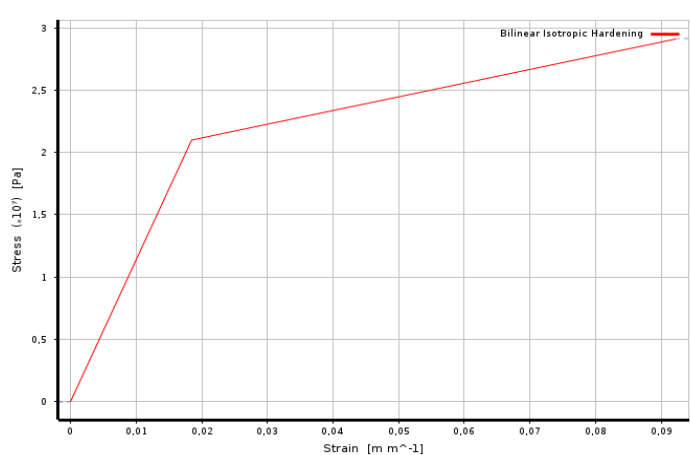
Pro numerický výpočet byl v programu ANSYS Workbench 2019 R1 vytvořen materiál s názvem PA11, kde byly zadány potřebné materiálové parametry, tzn. Youngův modul (Young's Modulus), mez kluzu (Yield Strength) a tečný modul (Tangent Modulus). Tyto a další materiálové parametry jsou zobrazeny v tabulce 7.2.

Tabulka 7.2 Materiálové parametry zadané v programu ANSYS Workbench

Property	Value	Unit
Material Field Variables	Table	
Isotropic Elasticity		
Derive from	Young's Modulus and Poisso...	
Young's Modulus	1138	MPa
Poisson's Ratio	0,3	
Bulk Modulus	9,4833E+08	Pa
Shear Modulus	4,3769E+08	Pa
Bilinear Isotropic Hardening		
Yield Strength	21	MPa
Tangent Modulus	110	MPa

Při pevnostní kontrole se materiál dostává do nelineární oblasti a dochází ke vzniku plastické deformace. Pokud je materiál při namáhání v nelineární oblasti, při odlehčení dochází k vymizení elastické deformace a zůstává pouze deformace plastická.

Jak již bylo zmíněno v kapitole 6.4, při modelování napětí-ově-deformačního chování ortopedické pomůcky Piro je použit bilineární materiálový model, kdy je křivka skutečného diagramu nahrazena lomenou přímkou skládající se z pružné a plastické části.



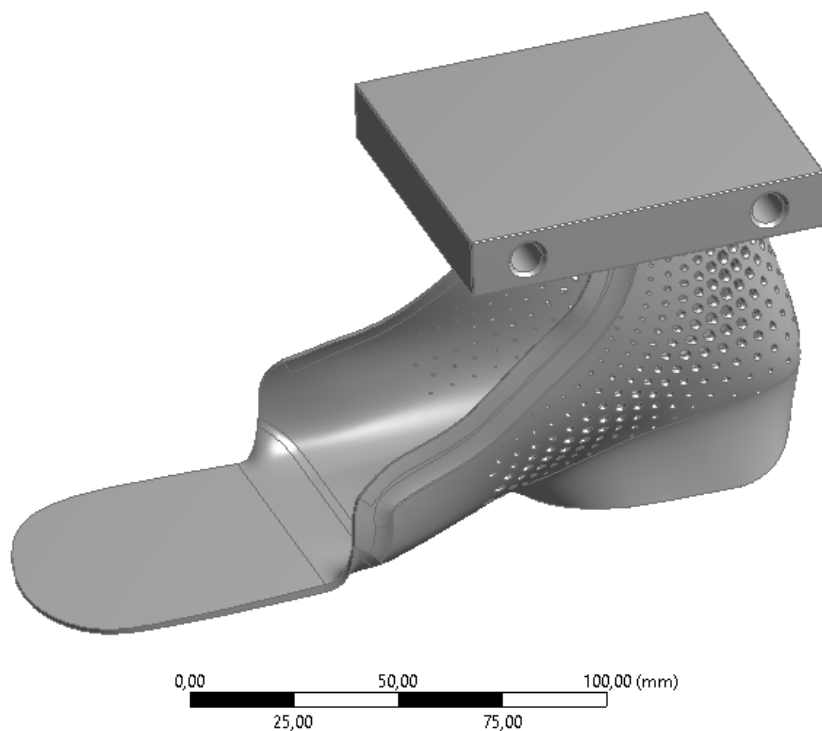
Obrázek 7.5 – Bilineární materiálový model vygenerovaný programem ANSYS

### 7.3 Úprava dodaného geometrického modelu

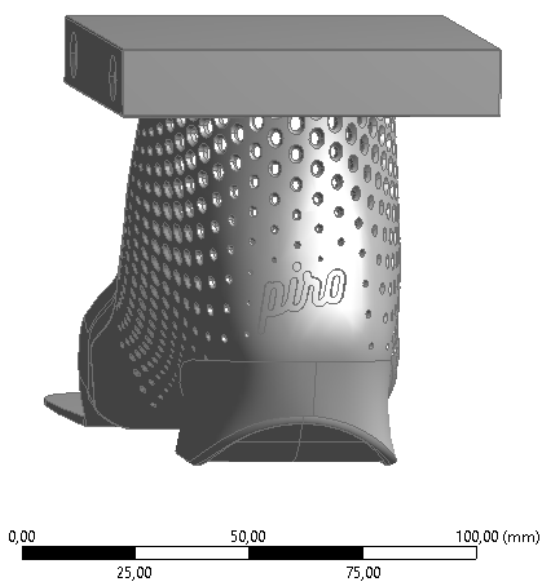
Pevnostní analýza je provedena na základě dvou dodaných geometrických modelů (základní model a model s vrubem) od firmy Invent Medical. Modely ve formátu STP byly importovány do programu ANSYS a následně upraveny v DesignModeleru.

#### 7.3.1 Základní model

Prvním krokem je import modelu a jeho vygenerování v programu DesignModeler, který je součástí programu ANSYS. Na obrázcích 7.6 a 7.7 je základní model před úpravou.

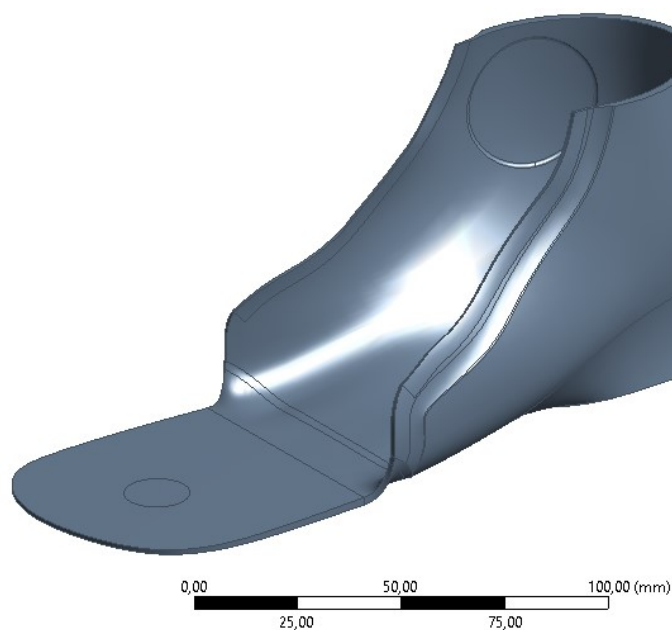


Obrázek 7.6 – Základní model před úpravou



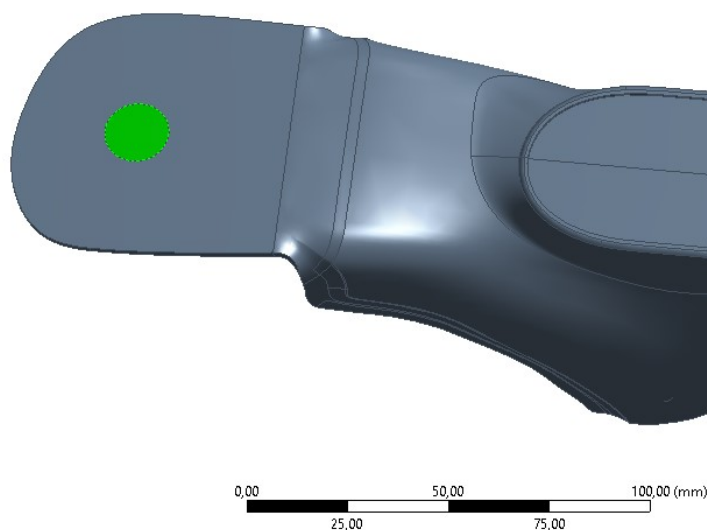
Obrázek 7.7 – Základní model před úpravou

Importovaný model byl z důvodu nedostatečného hardwaru a komplikovanosti sítě upraven tak, aby byl snížen počet elementů, výpočetní čas i požadavky na hardware. Došlo k odstranění vrchní části modelu, odstranění větracích otvorů a názvu produktu v zadní části ortézy.



Obrázek 7.8 – Základní model po úpravě

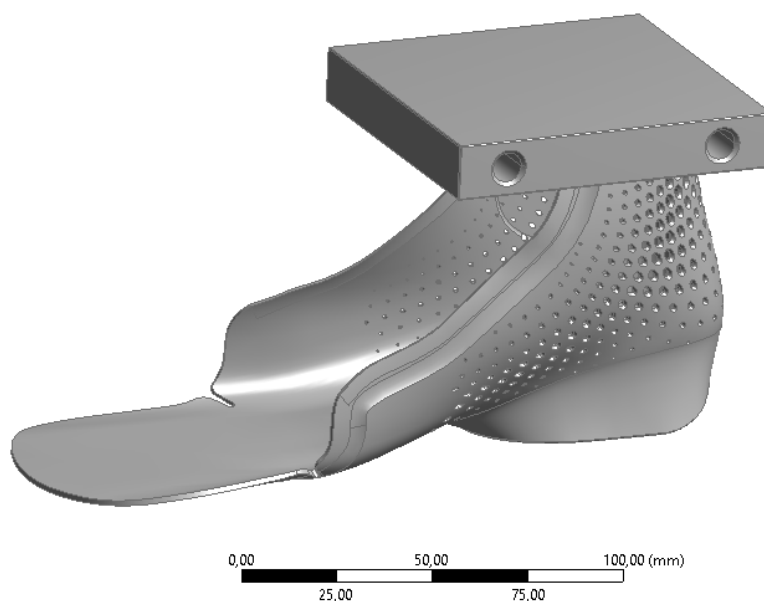
Další úpravou je vytvoření plochy, na kterou bude následně aplikováno zatížení ve formě síly. Umístění plochy odpovídá umístění při realizovaném experimentu. Plocha je vytvořena pomocí náčrtu, na kterém je umístěn kruh, který je následně vysunut pomocí nástroje Extrude. Nově vytvořené těleso je obtisknuto na model ortézy pomocí nástroje Imprint Faces, čímž vznikne požadovaná plocha, viz obrázek 7.9.



Obrázek 7.9 – Základní model po úpravě

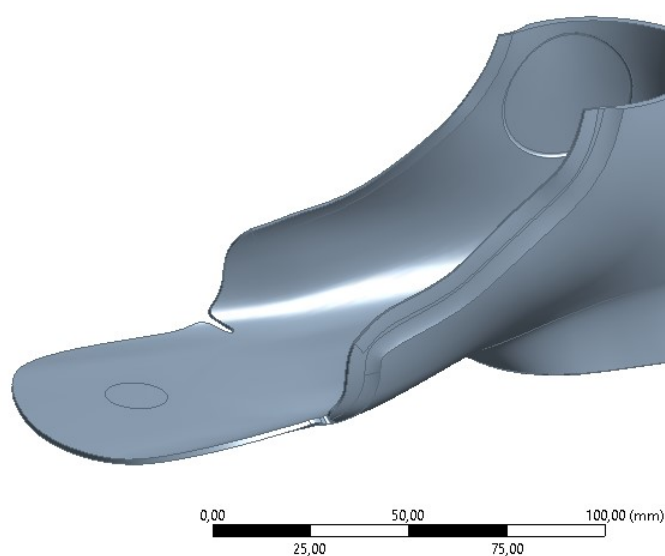
### 7.3.2 Model s vrubem

U druhého dodaného modelu je přidán vrub, viz obrázek 7.10.



Obrázek 7.10 – Model s vrubem před úpravou

Po importování modelu do programu ANSYS Workbench je model s vrubem upraven v programu DesignModeler stejným způsobem jako model předchozí. Došlo k odstranění horní části modelu, větracích otvorů, nápisu v zadní části modelu a vytvoření plochy, na kterou bude aplikováno zatížení. Upravený model můžeme vidět na obrázku 7.11.

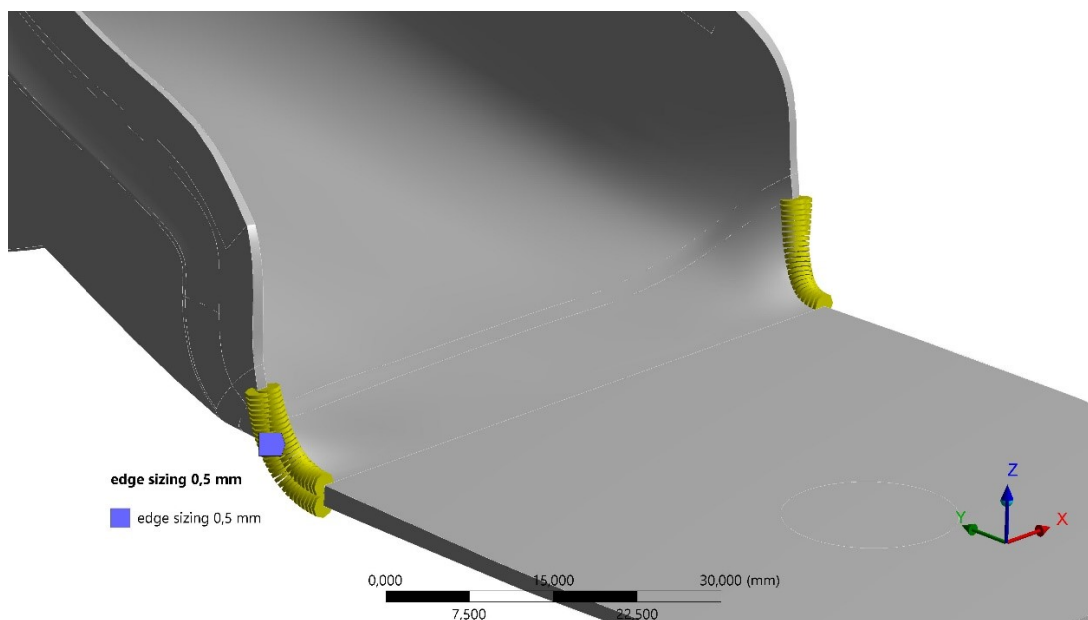


Obrázek 7.11 – Model s vrubem po úpravě

## 7.4 Vytvoření konečnoprvkové sítě

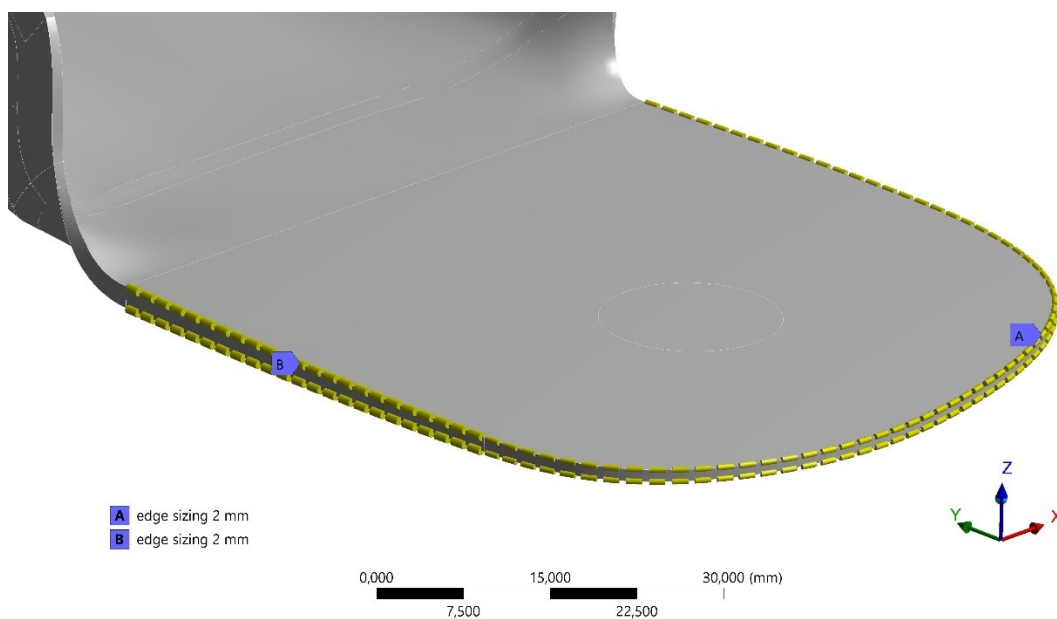
### 7.4.1 Základní model

Základní velikost elementu byla zvolena 4 mm. Následně je síť na vybraných hranách upravena pomocí funkce Edge Sizing s nastavením velikostí elementu 0,5 mm. Hrany jsou vybrány v místech, kde se očekává vysoká koncentrace napětí. Důsledkem použití funkce Edge Sizing je zjemnění sítě. Vybrané hrany jsou vyznačeny na obrázku 7.12.



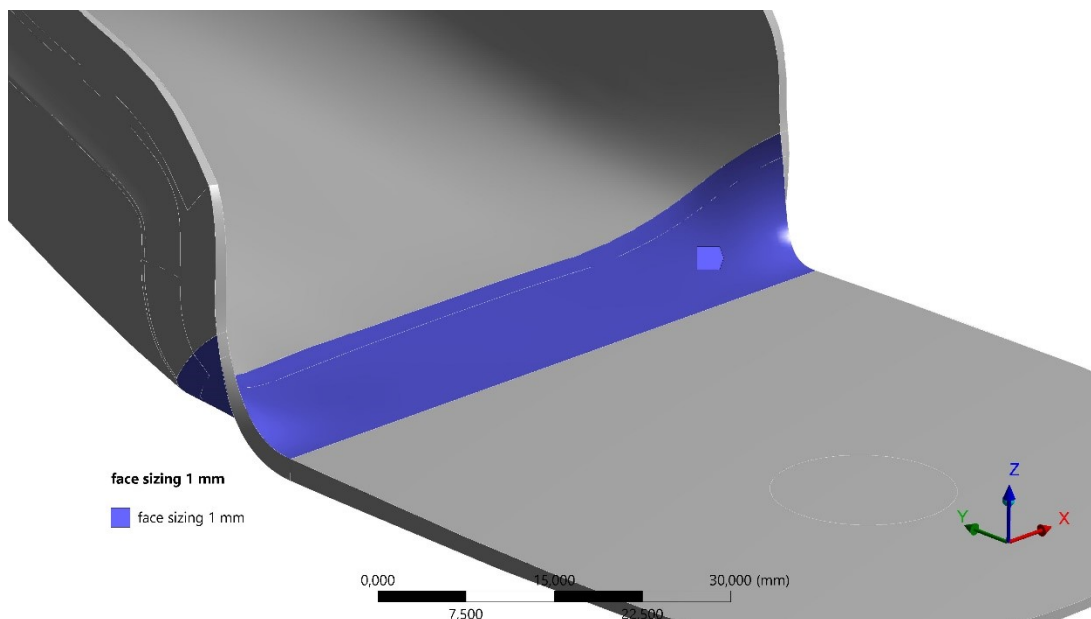
Obrázek 7.12 – Použití funkce Edge Sizing v oblasti s vysokými hodnotami napětí

Dále je použita funkce Edge Sizing s velikostí elementu 2 mm na hranách ve spodní části modelu, viz obrázek 7.13.



Obrázek 7.13 – Použití funkce Edge Sizing s velikostí elementu 2 mm

Poslední úprava sítě spočívá v použití funkce Face Sizing s nastavením velikosti elementu 1 mm na plochách, kde se očekává, že bude docházet ke koncentraci napětí, viz obrázek 7.14.



Obrázek 7.14 – Použití funkce Face Sizing s velikostí elementu 1 mm

Na obrázku 7.15 lze vidět vytvořenou konečnoprvkovou síť.



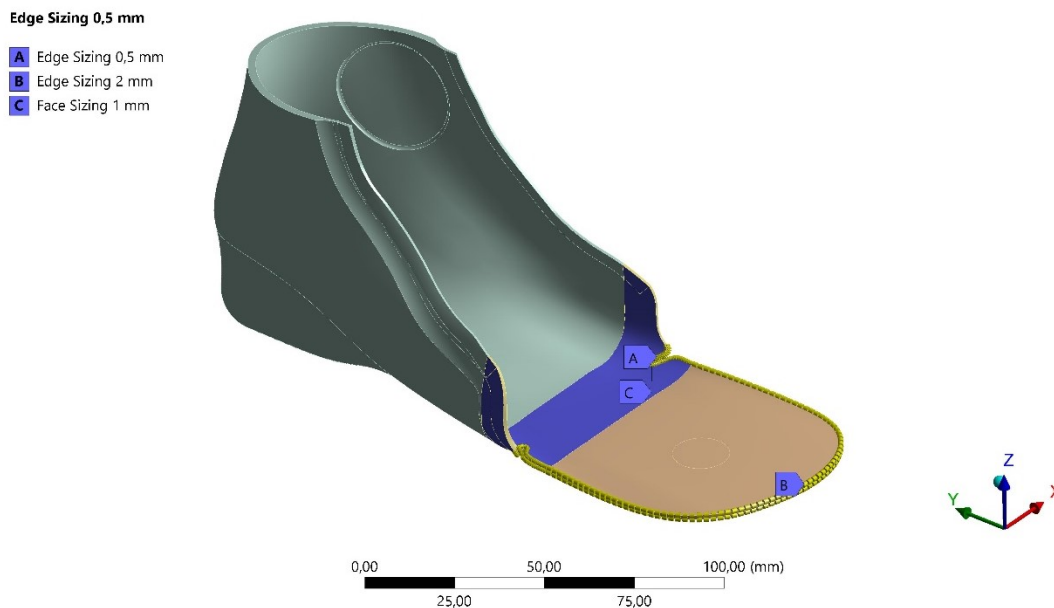
Obrázek 7.15 – Konečnoprvková síť základnímu modelu



#### 7.4.2 Model s vrubem

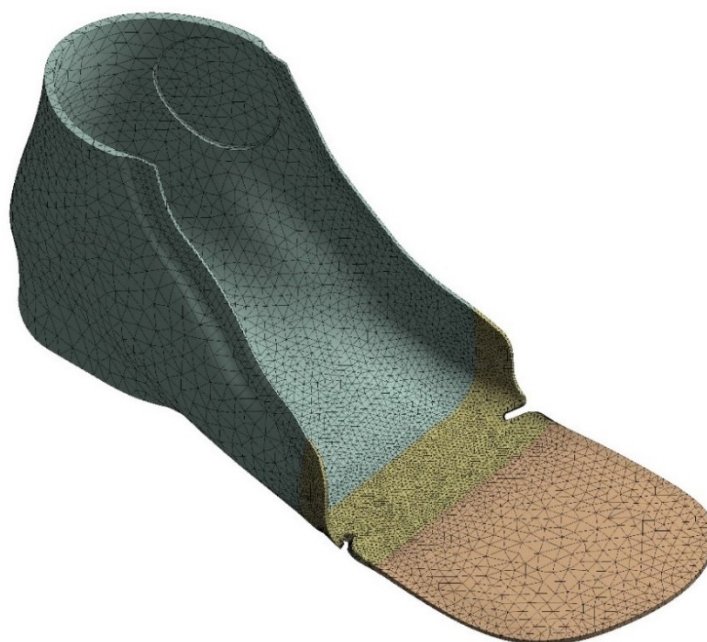
Nejprve je geometrie rozdělena na 3 části z důvodu lepší tvorby konečnoprvkové sítě. Jelikož bude vhodnost dané úpravy modelu posuzována podle koncentrace napětí v exponovaném místě, je tedy snaha o dosažení co nejpodobnější sítě.

Základní velikost elementu je zvolena 4 mm. Síť je také upravena pomocí funkce Edge Sizing s velikostí elementu 0,5 mm na hranách, kde se očekává koncentrace napětí, dále funkce Edge Sizing s velikostí elementu 2 mm na hranách na spodní části modelu a použití funkce Face Sizing s velikostí elementu 1 mm na plochách, kde se očekává koncentrace napětí, viz obrázek 7.16.



Obrázek 7.16 – Úprava konečnoprvkové sítě modelu s vrubem

Výsledná konečnoprvková síť lze vidět na obrázku 7.17.



Obrázek 7.17 – Výsledná konečnoprvková síť modelu s vrubem

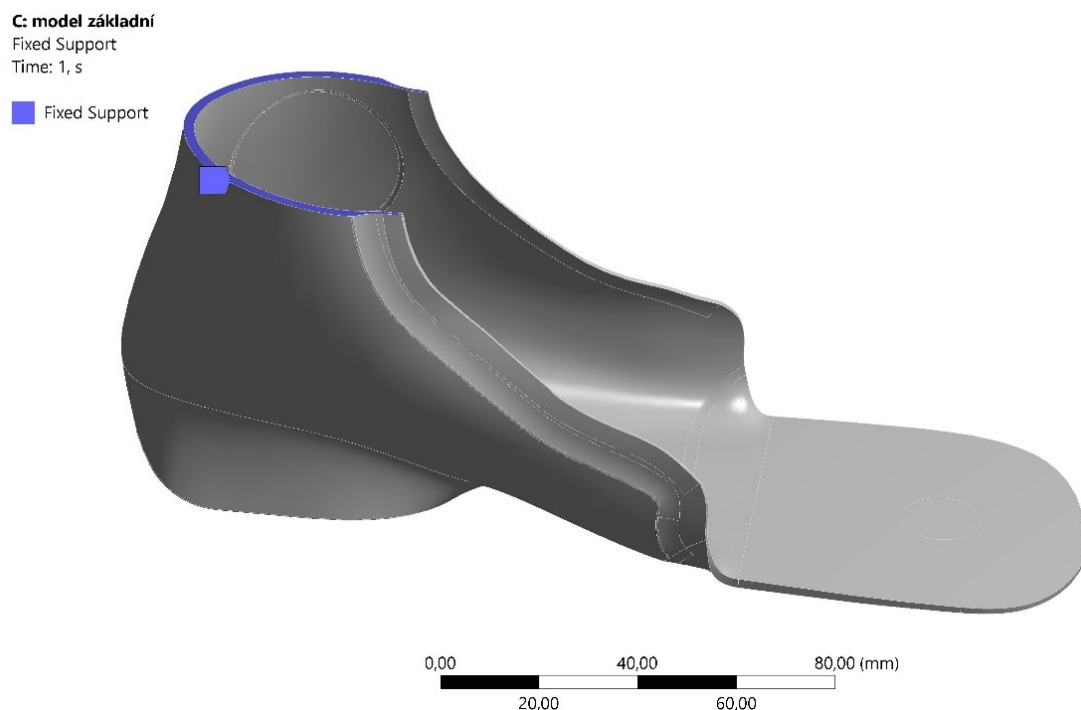
## 7.5 Okrajové podmínky

Volba okrajových podmínek vychází z realizovaného experimentu. Cílem je vytvořit model tohoto experimentu, který je oproti jeho realizaci finančně i časově výhodnější. Experiment slouží ke zjištění vhodného tvaru ortézy v místech, kde dochází ke koncentraci napětí a plastické deformaci.

Ve skutečnosti je experiment realizován jako simulace cyklického zatížení. Pokud je experiment nahrazen numerickou simulací, nejedná se o simulaci cyklického zatížení. Přesto lze vyhodnotit vhodnost úpravy tvaru místa s koncentrací na základě maximální hodnoty napětí.

### 7.5.1 Základní model

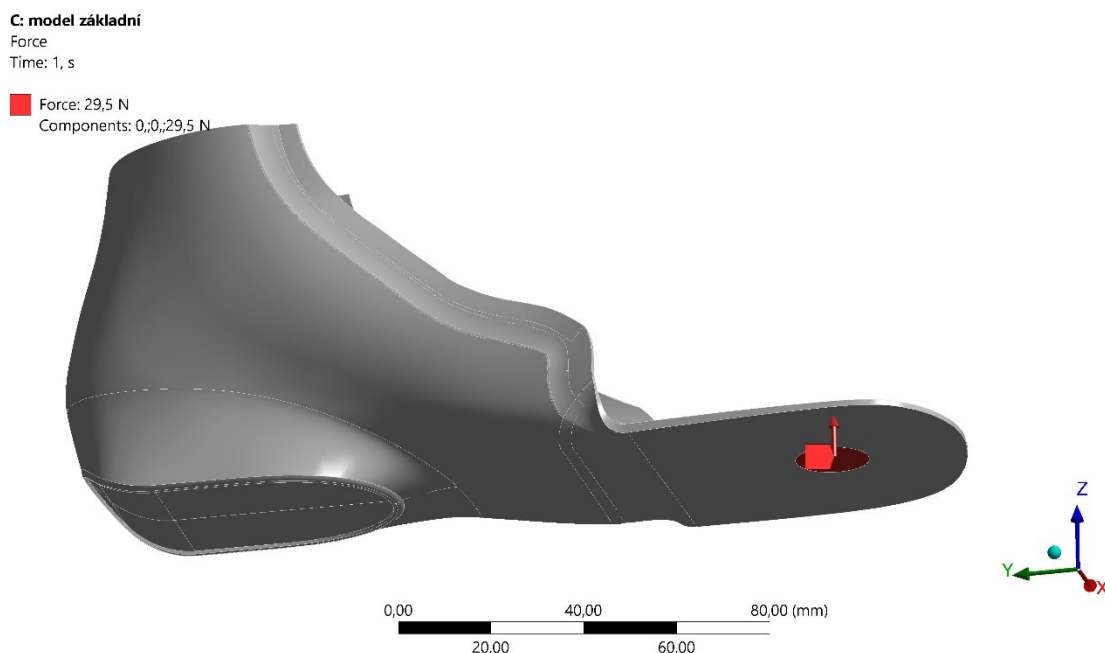
Při realizaci experimentu je horní část ortézy pevně uchycena ve speciálním nástavci, který zamezuje všechny posuvy i rotace. Při numerické simulaci je uchycení nahrazeno vazbou Fixed Support na horní ploše modelu, viz obrázek 7.18.



Obrázek 7.18 – Vazba Fixed Support

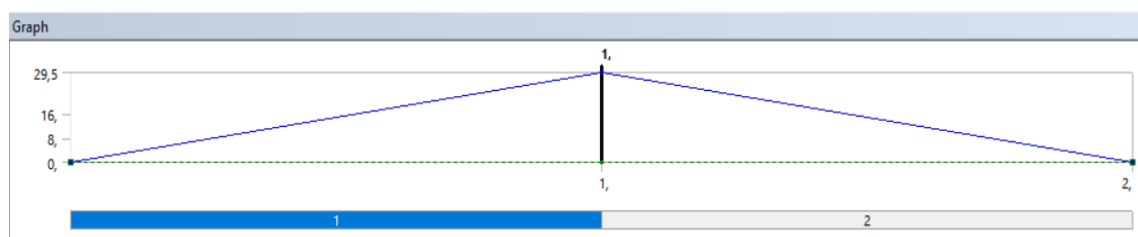
Dále je na model aplikováno zatížení ve formě síly. Při realizaci experimentu, tedy i při numerické simulaci, je požadován ohyb přední části ortézy o  $45^\circ$ . Na tuto hodnotu byla lazena velikost síly. Ohyb přední části ortézy simuluje namáhání ortézy při chůzi.

Síla je aplikována ve směru osy Z pomocí zatížení Force na plochu, která je vyznačená na obrázku níže. Ohybu o úhel  $45^\circ$  odpovídá síla 29,5 N.



Obrázek 7.19 – Zatížení základního modelu silou 29,5 N


Aby bylo možné zjistit plastickou deformaci a posunutí po odlehčení, je zatížení rozděleno na 2 kroky. Na začátku simulace je hodnota zatěžující síly rovna nule, na konci prvního kroku je zatěžující síla rovna maximu, tedy 29,5 N, a na konci druhého kroku je model odlehčen a zatěžující síla je rovna nule, viz obrázek 7.20.

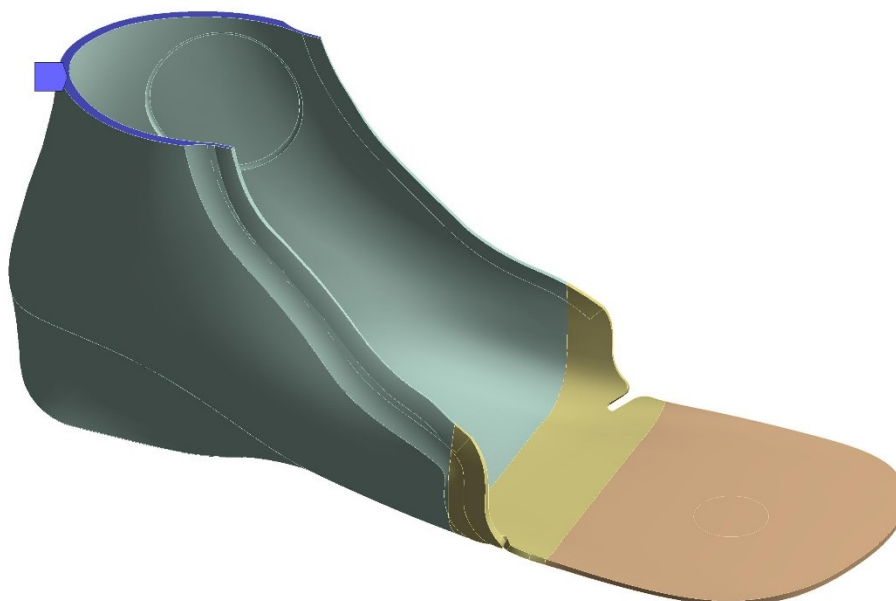


Obrázek 7.20 – Graf zatížení silou o velikosti 29,5 N ve směru Z

### 7.5.2 Model s vrubem


Okrajové podmínky modelu s vrubem jsou obdobné jako u základního modelu. K zamezení všech posuvů a rotací je použita vazba Fixed Support na horní ploše ortézy.

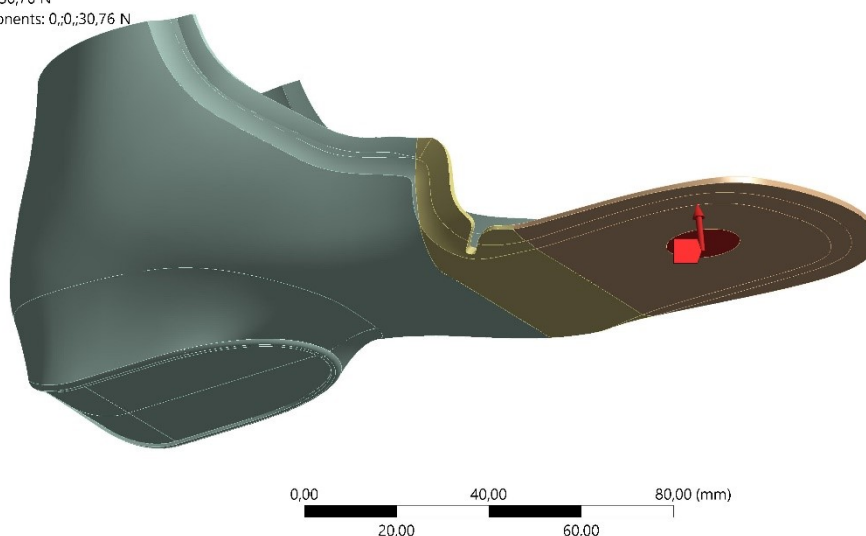
**F: model s vrubem**  
Fixed Support  
Time: 1, s  
 Fixed Support



Obrázek 7.21 – Vazba Fixed Support

Dále je na model aplikováno zatížení ve formě síly. Síla je aplikována ve směru osy Z pomocí zatížení Force na plochu, která je vyznačená na obrázku níže. Ohybu o úhel  $45^\circ$  odpovídá síla 30,76 N. Síla je taktéž rozdělena do dvou zatěžujících kroků, obdobně jako u základního modelu.

**F: model s vrubem**  
Force  
Time: 1, s  
 Force: 30,76 N  
Components: 0,0,30,76 N



Obrázek 7.22 – Zatížení modelu s vrubem silou 29,5 N

## 7.6 Nastavení výpočtu

Jelikož se jedná o nelineární výpočet, je nutné rozdělit sílu v rámci jednoho kroku (Step) do několika dílčích kroků (Substeps). V rámci nastavení výpočtu je potřebné nastavit základní počet dílčích kroků (Initial Substeps), minimální počet dílčích kroků (Minimum Substeps) a maximální počet kroků (Maximum Substeps), viz obrázek 7.23. Pro oba kroky je nastavení počtu dílčích kroků shodné.

Details of "Analysis Settings"	
Step Controls	
Number Of Steps	2,
Current Step Number	1,
Step End Time	1, s
Auto Time Stepping	On
Define By	Substeps
Initial Substeps	50,
Minimum Substeps	30,
Maximum Substeps	400,

Obrázek 7.23 – Nastavení dílčích kroků (Substeps)

Vzhledem k tomu, že se jedná o nelineární výpočet, je v nastavení výpočtu zapnuto kritérium Large Deflection, tedy možnost velkého posunutí.

Details of "Analysis Settings"	
Solver Controls	
Solver Type	Program Controlled
Weak Springs	Off
Solver Pivot Checking	Program Controlled
Large Deflection	On
Inertia Relief	Off

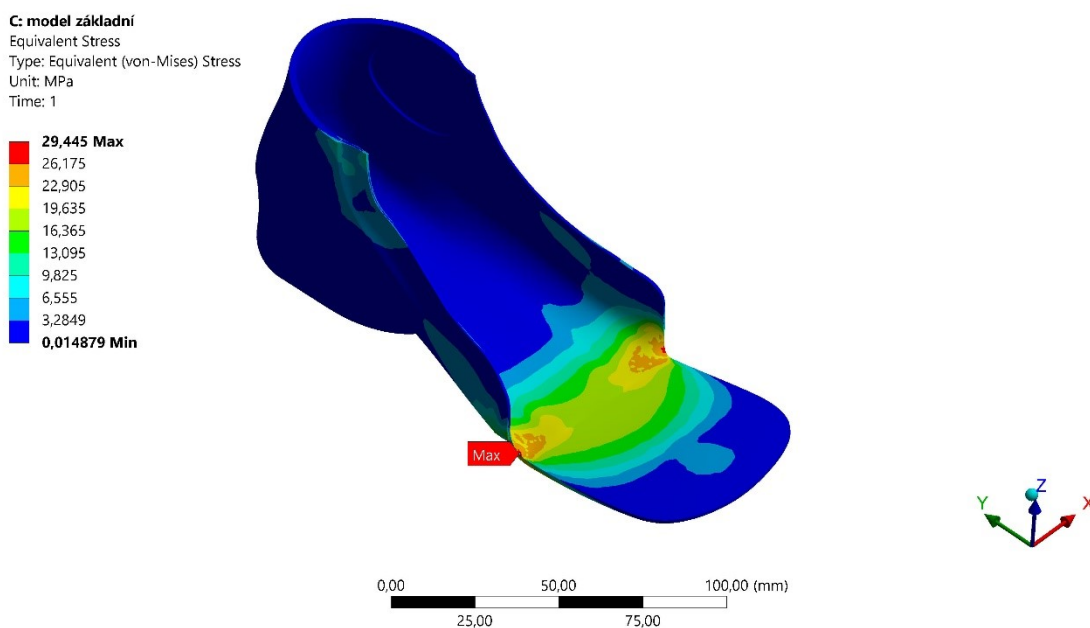
Obrázek 7.24 – Large Deflection

## 8 Výsledky pevnostní analýzy

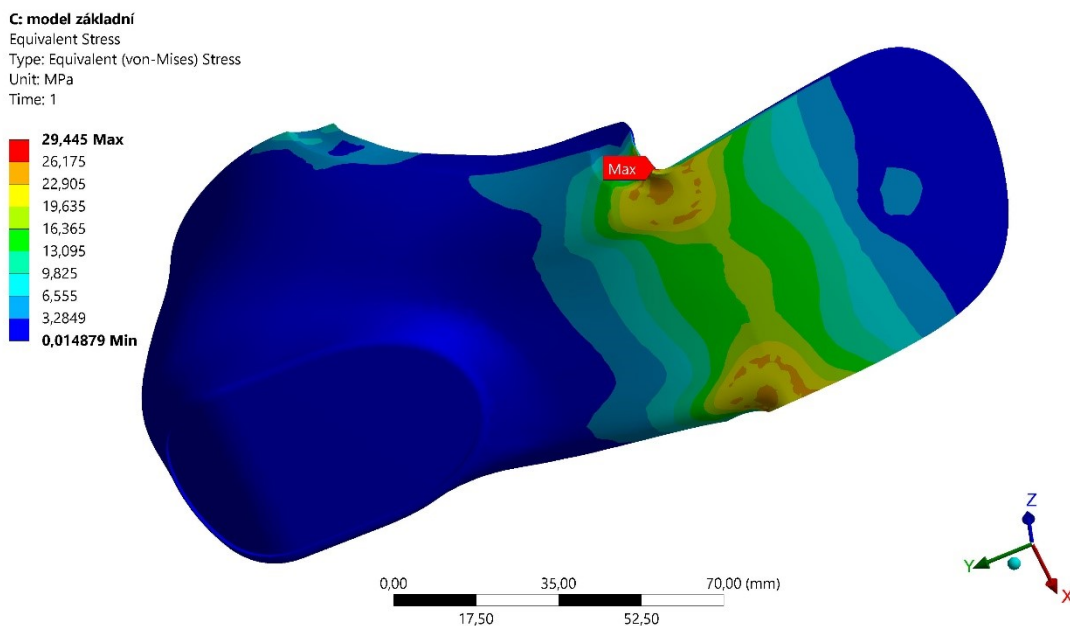
### 8.1 Základní model

#### 8.1.1 Redukované napětí

Na následujících obrázcích 8.1–8.3 je zobrazen průběh redukovaného napětí dle hypotézy HMM (von Mises) při zatížení silou 29,5 N. Lze vidět, že nejvíce namáhaná místa se nachází v oblasti ohybu ortézy, kde se napětí pohybuje v rozmezí hodnot od 20 do 29,45 MPa (žlutá až červená oblast).



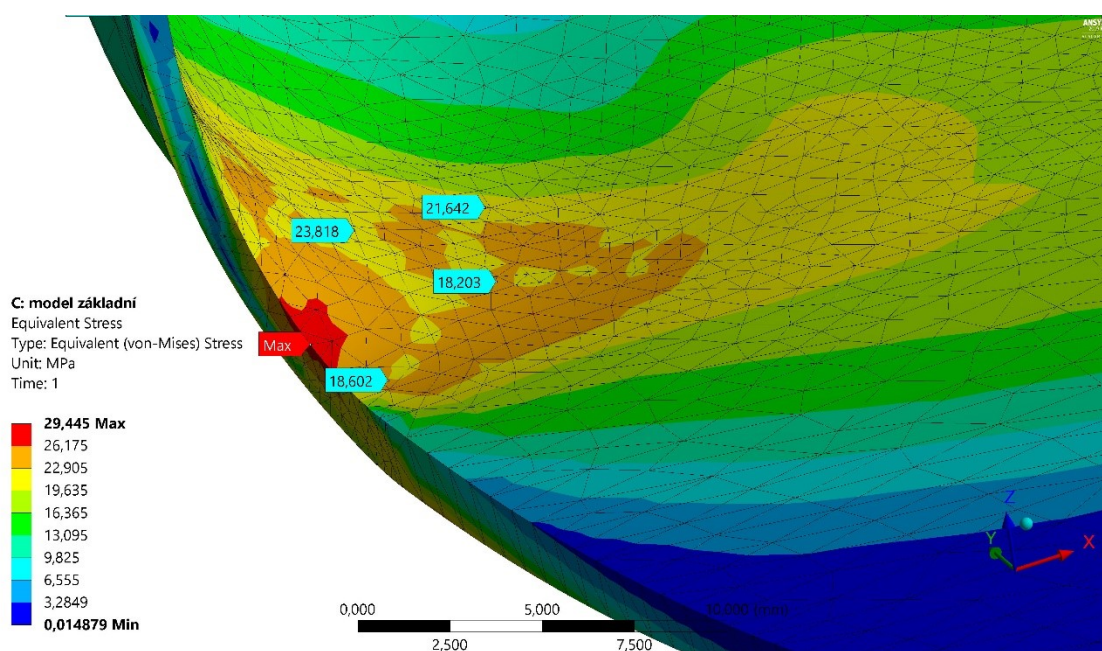
Obrázek 8.1 – Průběh redukovaného napětí dle hypotézy HMM na základním modelu



Obrázek 8.2 – Průběh redukovaného napětí dle hypotézy HMM na základním modelu



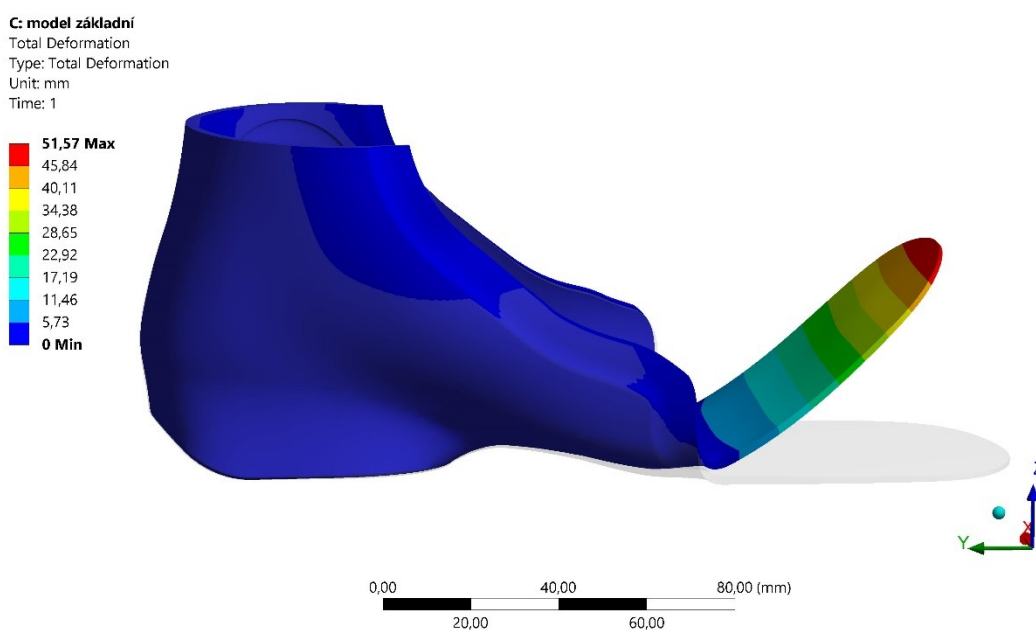
Na obrázku 8.3 lze vidět detail místa s nejvyšší hodnotou redukovaného napětí, tedy 29,45 MPa.



Obrázek 8.3 – Detail místa s nejvyšší hodnotou redukovaného napětí na základním modelu

### 8.1.2 Posunutí při zatížení silou

Na obrázku 8.4 je vykresleno posunutí základního modelu na konci prvního kroku, kdy je přední část ortézy ohnuta o požadovaný úhel  $45^\circ$  a hodnota zatěžující síly je 29,45 N. Na obrázku lze porovnat model před zatížením (šedá část) a po zatížení silou (barevná část). Maximální hodnota posunutí je 51,57 mm v přední části ortézy.

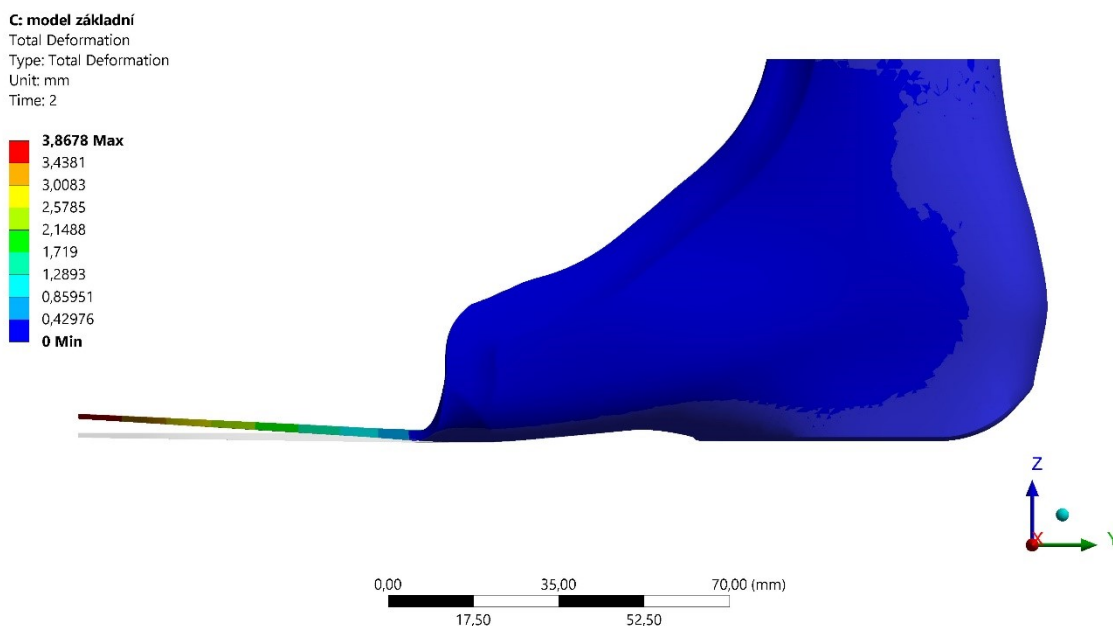


Obrázek 8.4 – Posunutí základního modelu při zatížení silou 29,5 N o 51,57 mm



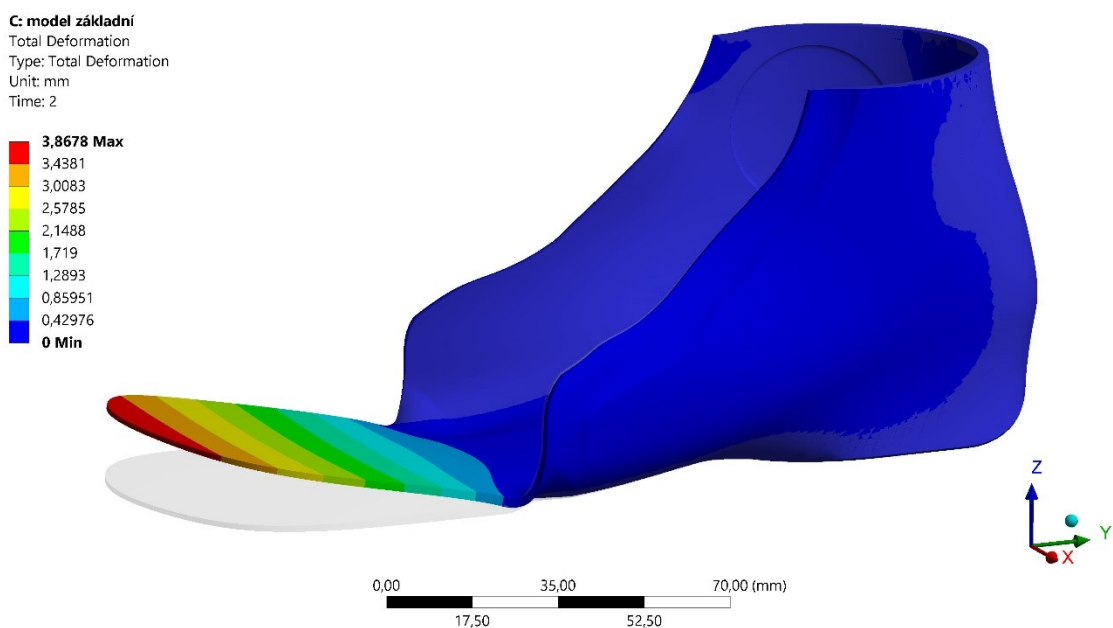
### 8.1.3 Posunutí při odlehčení

Na obrázku 8.5 je vykresleno posunutí základního modelu na konci druhého kroku, kdy dojde k odlehčení modelu (zatěžující síla je nulová). Jelikož hodnota redukovaného napětí v nejvíce namáhaných oblastech přesahuje mez kluzu (21 MPa), model se po odlehčení nevrací do původního stavu a je trvale deformovaný. Maximální hodnota posunutí po odlehčení je 3,87 mm v přední části ortézy. Na obrázku lze porovnat tvar modelu před zatížením silou (šedá část) a po odlehčení (barevná část) ve skutečném měřítku.



Obrázek 8.5 – Posunutí základního modelu po odlehčení

Pro lepší přehlednost je na obrázku níže vykreslení posunutí 4x zvětšeno.

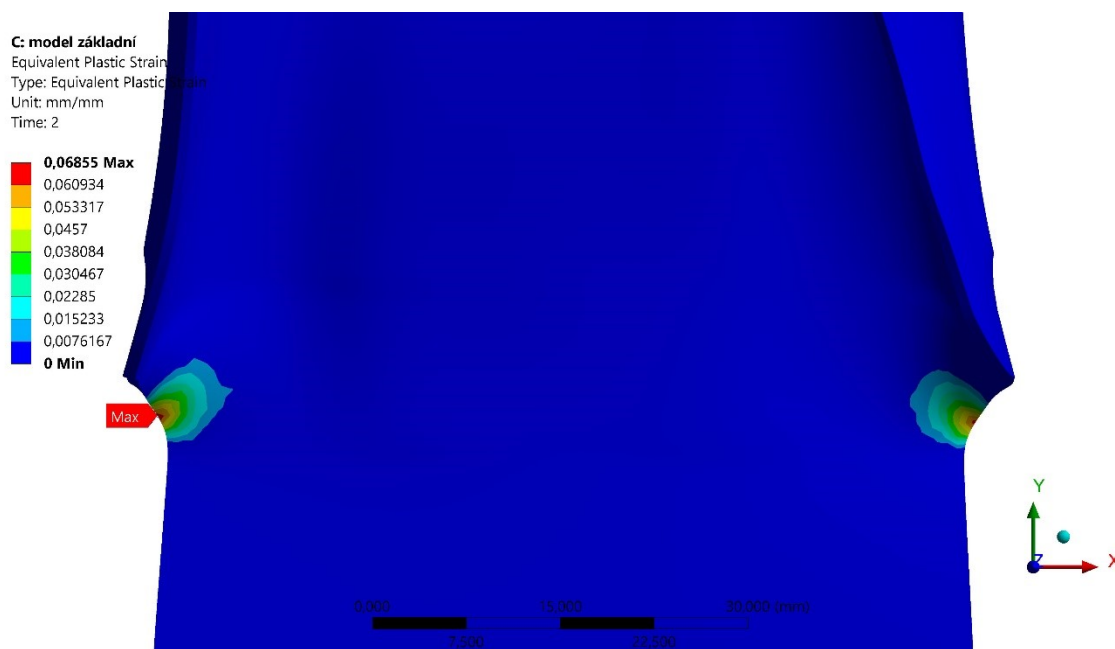


Obrázek 8.6 – Posunutí základního modelu po odlehčení

### 8.1.4 Plastická deformace

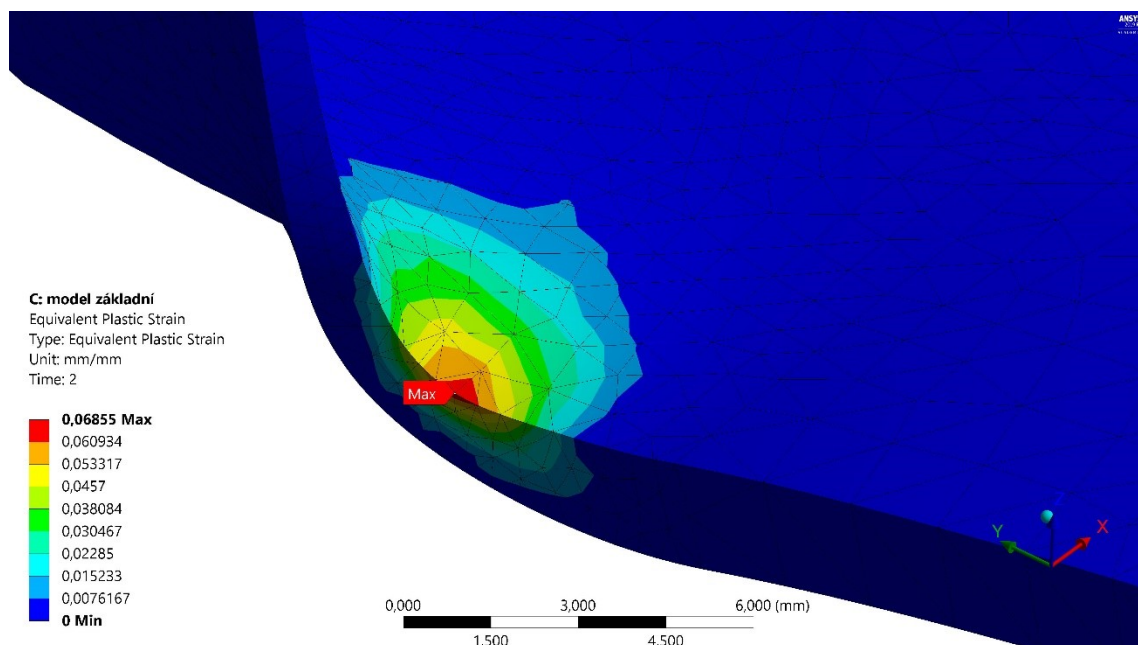
Plastická neboli trvalá deformace vzniká působením zatížení nad mezí pružnosti. Jak bylo zmíněno dříve, při namáhání modelu ortézy dochází v určitých místech k překročení meze kluzu, což má za následek vznik plastických deformací. Plastické deformace se projevují jako trvalá změna tvaru tělesa a dochází ke změně mikroskopické stavby materiálu. V okamžiku, kdy na těleso přestane působit vnější zatížení, dochází k vymizení elastické deformace, ale plastická deformace zůstane zachována.

Na obrázku 8.7 je zobrazen průběh plastické deformace.



Obrázek 8.7 – Plastická deformace po odlehčení základního modelu

Na obrázku níže je zobrazen detail místa s nejvyšší hodnotou plastické deformace 0,0686.

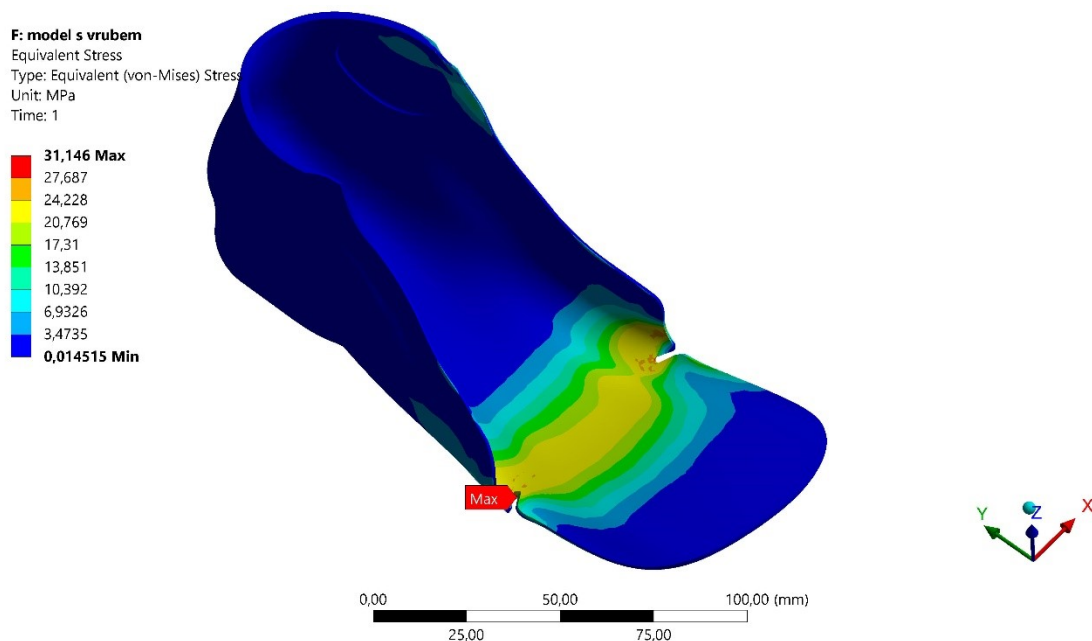


Obrázek 8.8 – Detail oblasti s nejvyšší hodnotou plastická deformace základního modelu

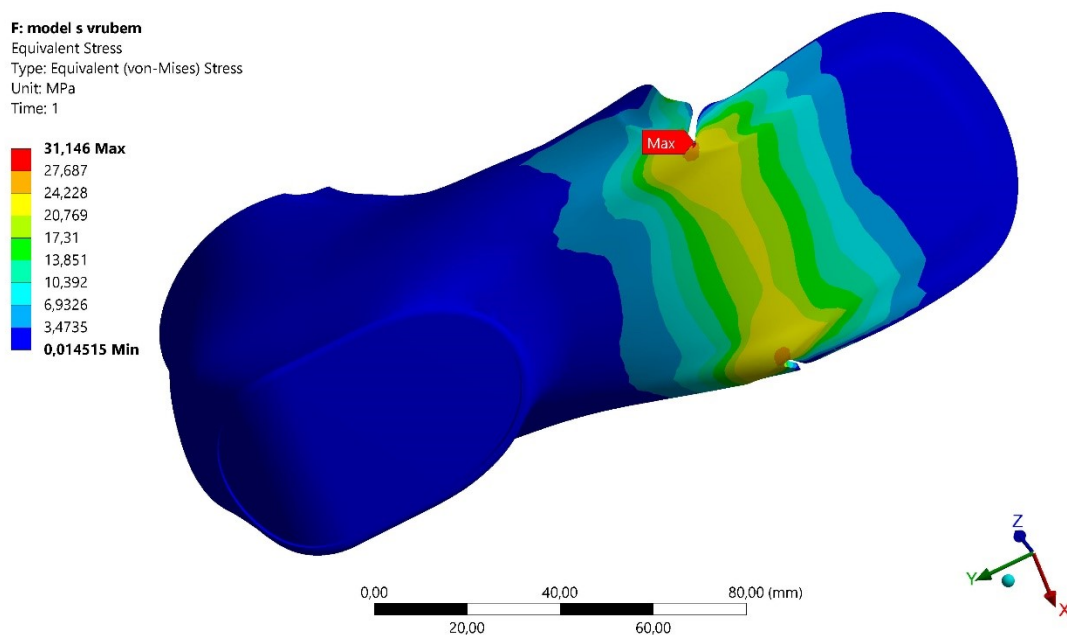
## 8.2 Model s vrubem

### 8.2.1 Redukované napětí

Na následujících obrázcích 8.9–8.11 je zobrazen průběh redukovaného napětí dle hypotézy HMH při zatížení silou 30,76 N. Lze vidět, že nejvíce namáhaná místa jsou v oblasti ohybu ortézy, kde se napětí pohybuje v rozmezí hodnot od 20 do 31,15 MPa (žlutá až červená oblast). V porovnání se základním modelem bez vrubu je hodnota maximálního redukovaného napětí vyšší.

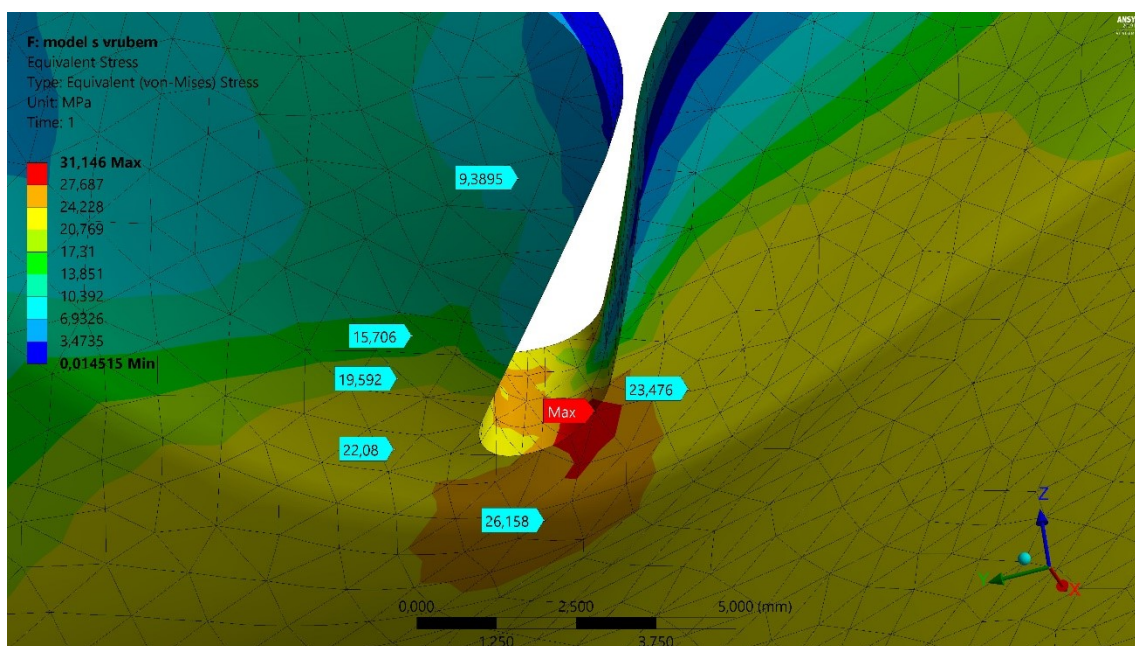


Obrázek 8.9 – Průběh redukovaného napětí dle hypotézy HMH na modelu s vrubem



Obrázek 8.10 – Průběh redukovaného napětí dle hypotézy HMH na modelu s vrubem

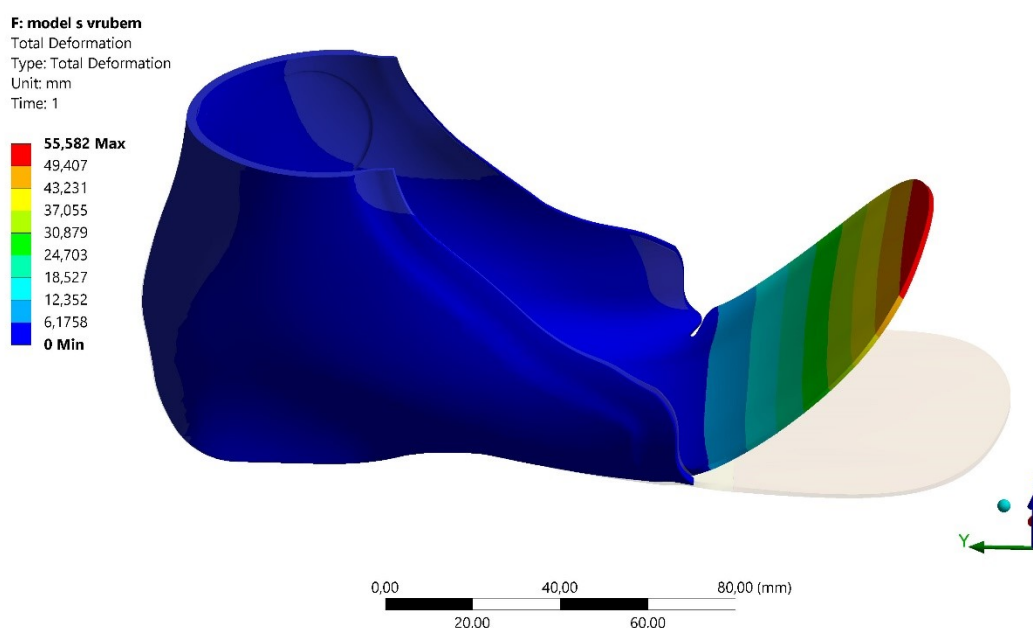
Na obrázku 8.11 lze vidět detail místa s nejvyšší hodnotou redukovaného napětí, tedy 31,15 MPa.



Obrázek 8.11 – Detail místa s nejvyšší hodnotou redukovaného napětí na modelu s vrubem

### 8.2.2 Posunutí při zatížení silou

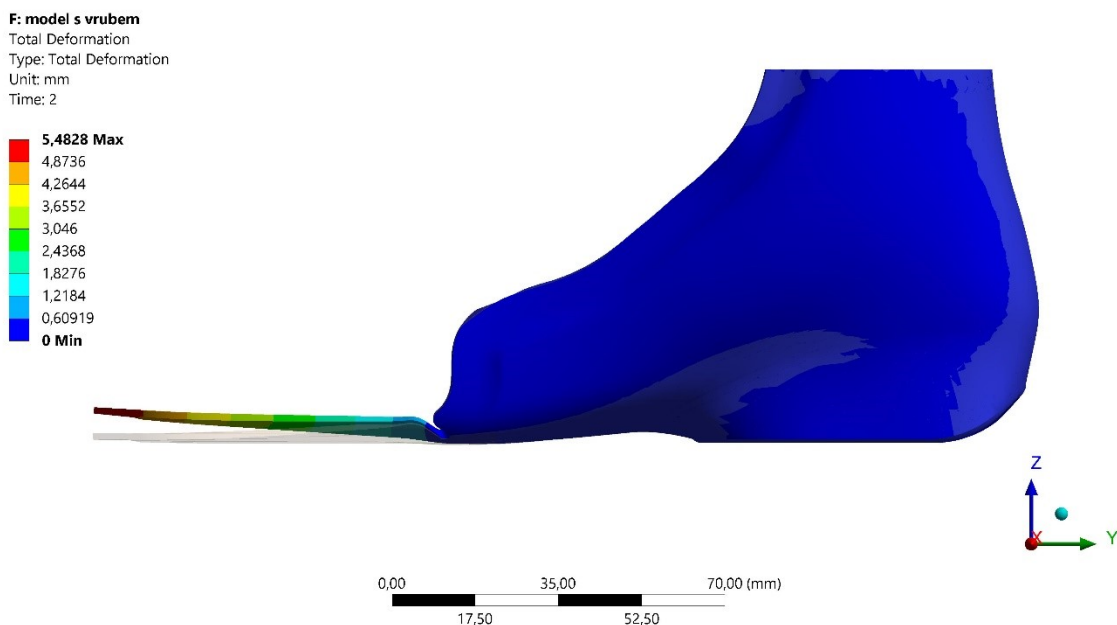
Na obrázku 8.12 je vykresleno posunutí základního modelu na konci prvního kroku, kdy je přední část ortézy ohnuta o požadovaný úhel  $45^\circ$  a hodnota zatěžující síly je 30,76 N. Maximální hodnota posunutí je 55,58 mm v přední části ortézy.



Obrázek 8.12 – Posunutí modelu s vrubem při zatížení silou 30,76 N o 55,58 mm

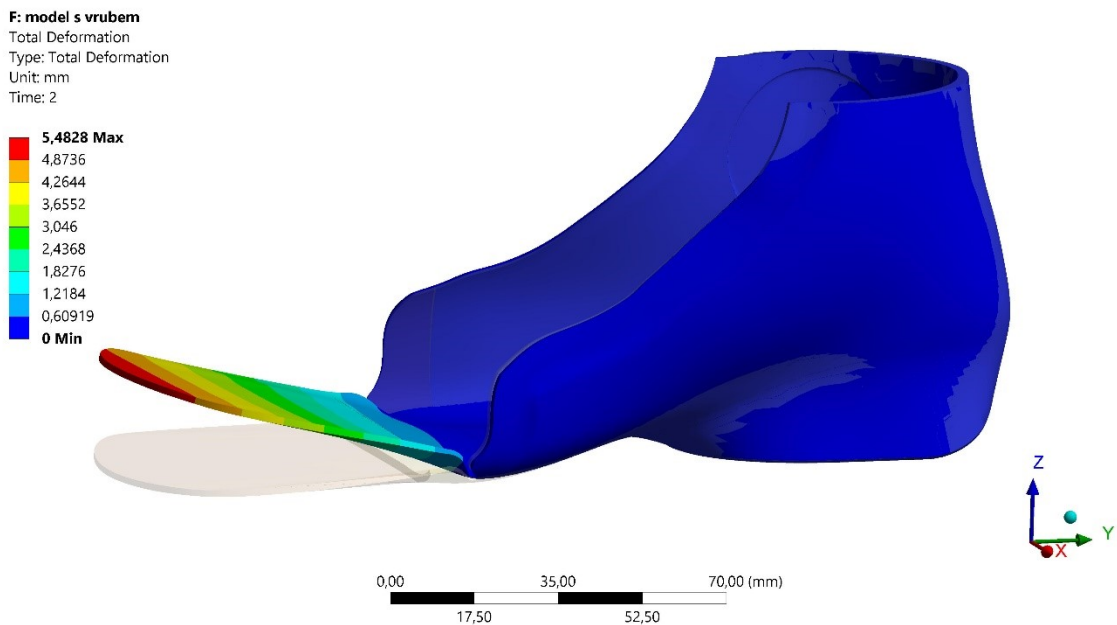
### 8.2.3 Posunutí po odlehčení

Na obrázku 8.13 je vykresleno posunutí základního modelu na konci druhého kroku, kdy dojde k odlehčení modelu. Maximální hodnota posunutí po odlehčení je 5,48 mm, což je více, než u modelu bez vrubu.



Obrázek 8.13 – Posunutí modelu s vrubem po odlehčení

Pro lepší přehlednost je na obrázku níže vykreslení posunutí 4x zvětšeno.

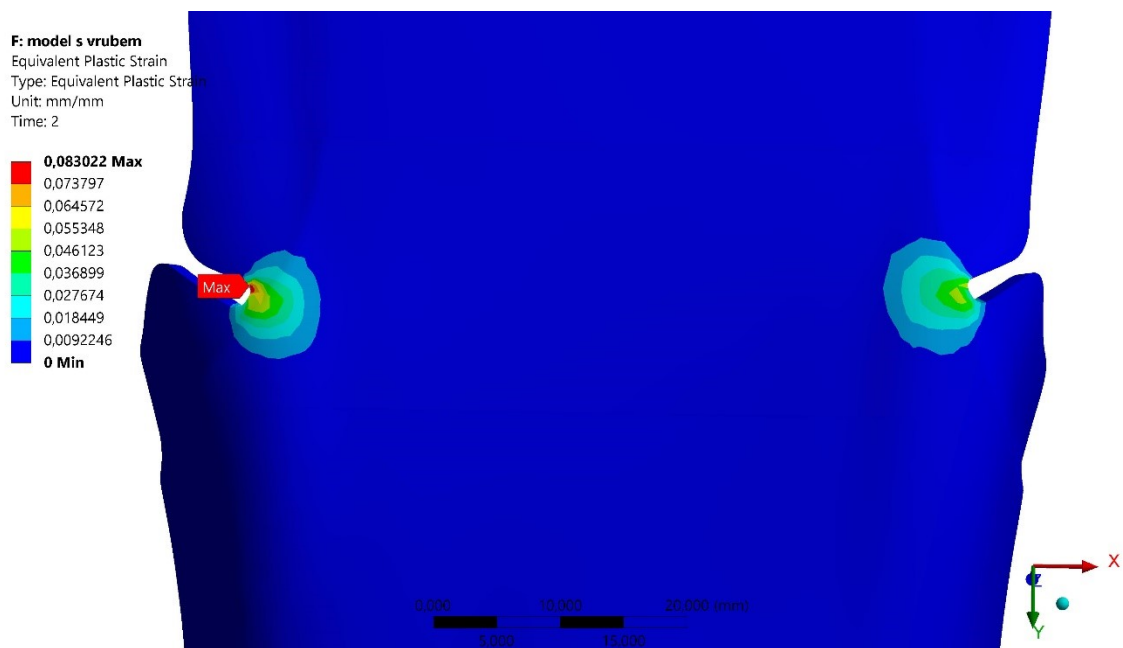


Obrázek 8.14 – Posunutí modelu s vrubem po odlehčení



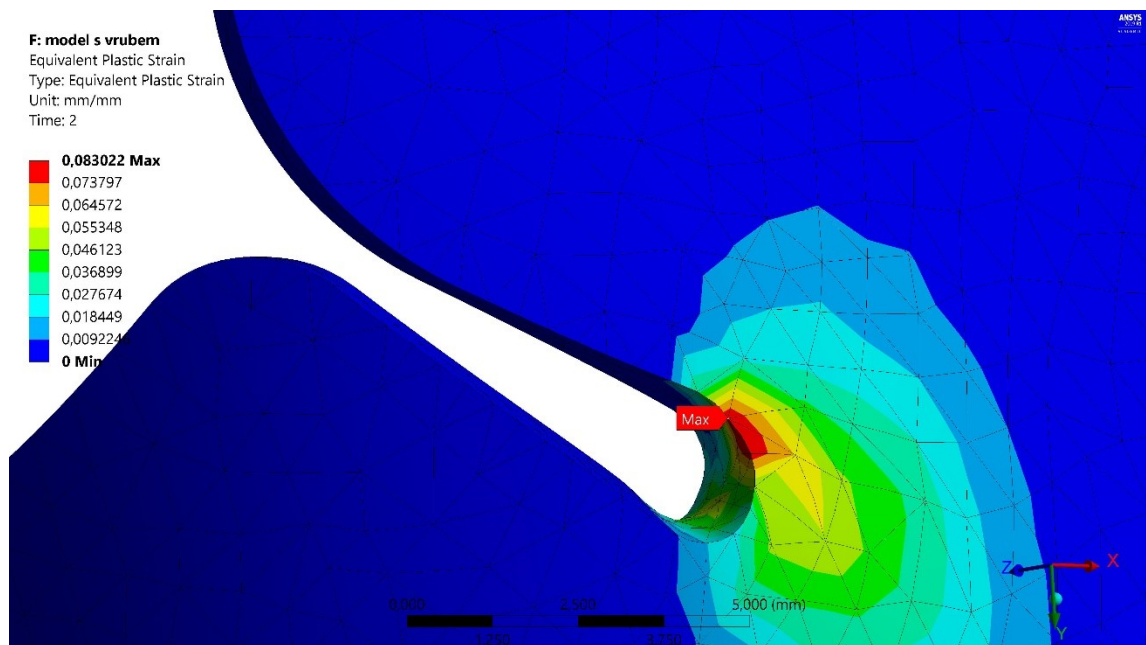
## 8.2.4 Plastická deformace

Na obrázku 8.15 a 8.16 je zobrazen průběh plastické deformace.



Obrázek 8.15 – Plastická deformace po odlehčení u modelu s vrubem

Na obrázku níže je zobrazen detail místa s nejvyšší hodnotou plastické deformace 0,0883.



Obrázek 8.16 – Detail oblasti s nejvyšší hodnotou plastická deformace u modelu s vrubem

## 9 Optimalizace modelů a pevnostní kontrola

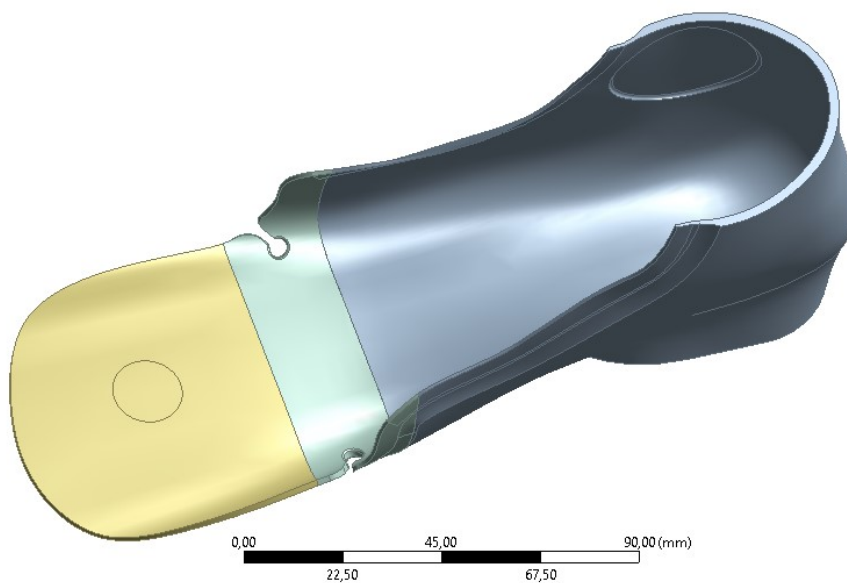
V další kapitole jsou oba modely upraveny za účelem snížení napětí v exponované části a snížení plastické deformace a následně je provedena pevnostní kontrola.

### 9.1 Úprava geometrie modelů

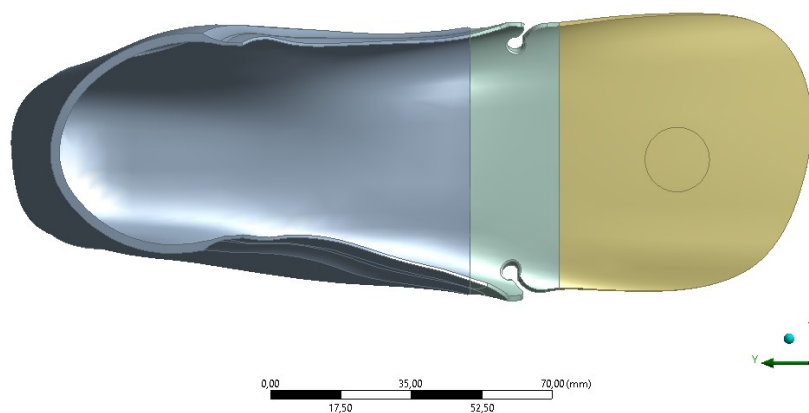
Geometrie modelů je upravena v programu DesignModeler.

#### 9.1.1 Úprava modelu s vrubem

První je upraven model s vrubem. V místě s nejvyšší hodnotou redukovaného napětí u neupraveného modelu došlo k vytvoření kruhového otvoru a zaoblení ostrých hran, viz obrázek 9.1 a 9.2.



Obrázek 9.1 – Optimalizovaný model s vrubem

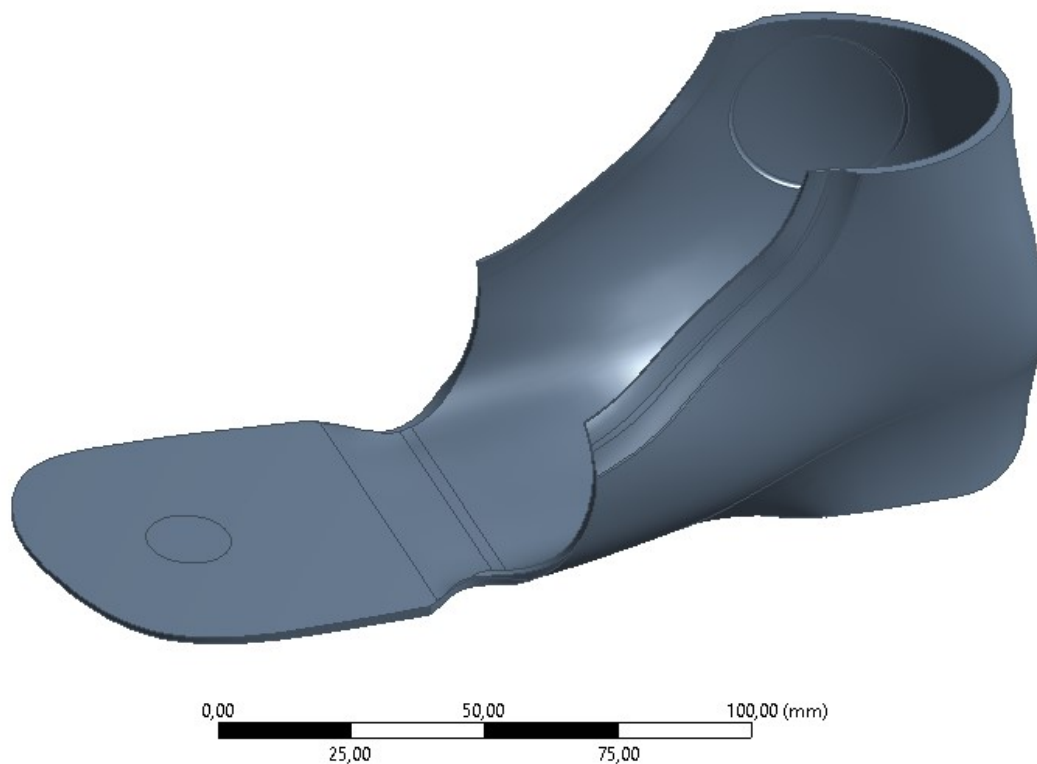


Obrázek 9.2 – Horní pohled na optimalizovaný model s vrubem

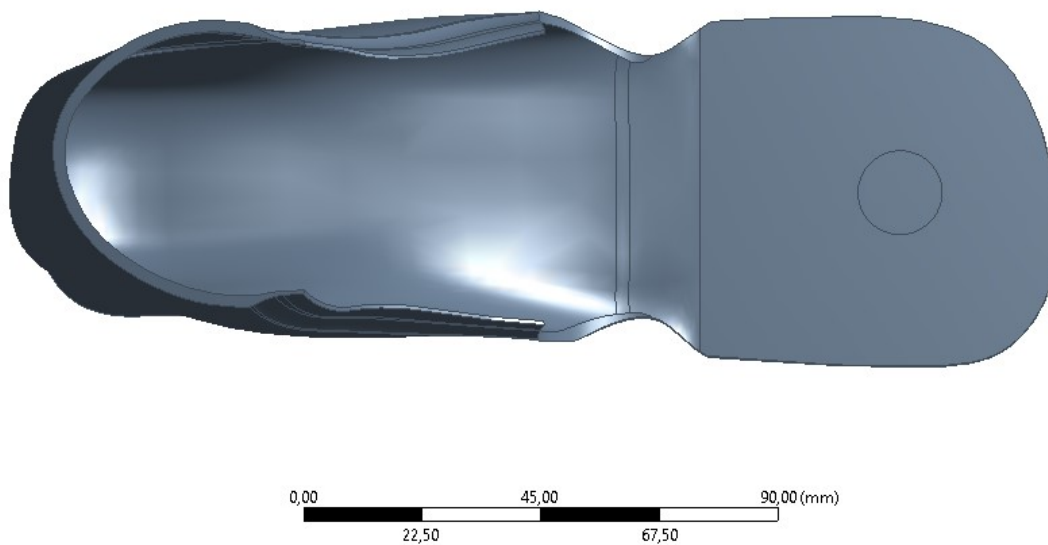


### 9.1.2 Úprava modelu bez vrubu

Další varianta je úprava základního modelu. Zde došlo ke komplexnější úpravě exponovaného místa, viz obrázky 9.3 a 9.4, zejména ke zvětšení poloměru zaoblení přechodu mezi spodní a boční částí.



Obrázek 9.3 – Optimalizovaný základní model

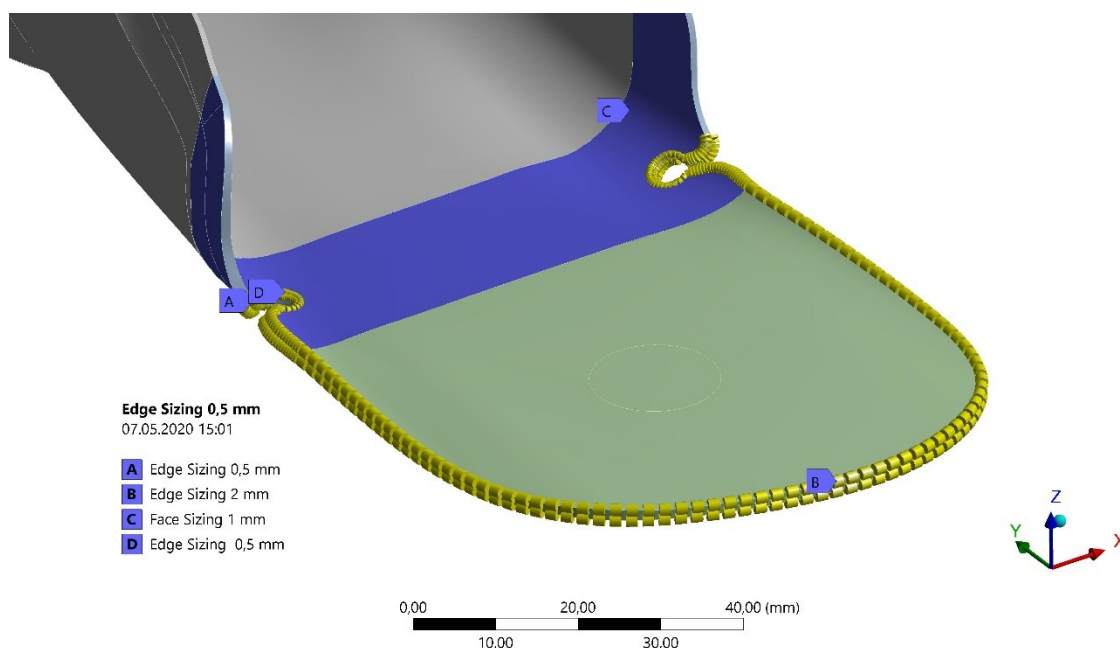


Obrázek 9.4 – Horní pohled na optimalizovaný základní model

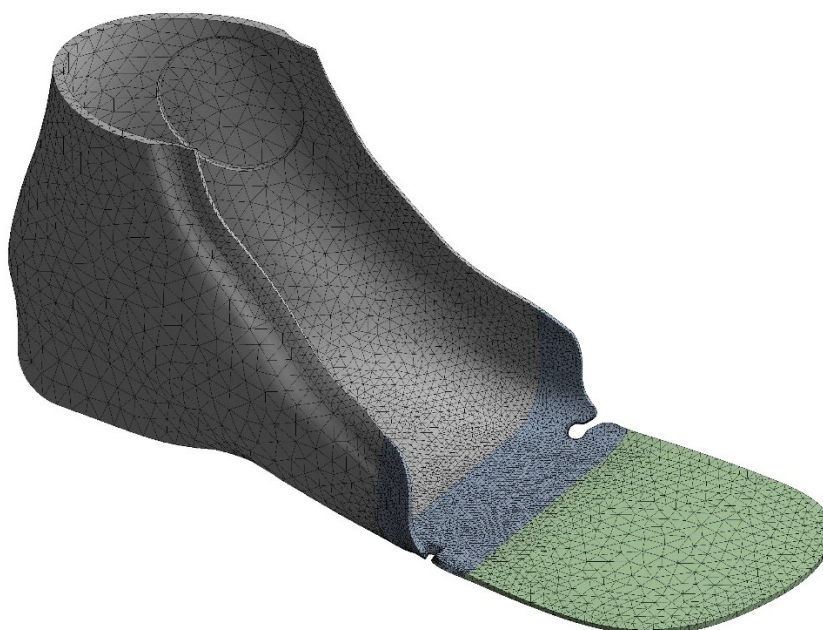
## 9.2 Vytvoření konečnoprvkové sítě

### 9.2.1 Optimalizovaný model s vrubem

Vzhledem k porovnávání výsledného napětí a deformace s původním modelem je snaha o dosažení co nejpodobnější sítě. Základní velikost elementu je zvolena 4 mm. Sít' je upravena pomocí funkce Edge Sizing s velikostí elementu 0,5 mm na hranách, kde se očekává koncentrace napětí. Dále je použita funkce Edge Sizing s velikostí elementu 2 mm na hranách na spodní části modelu a Face Sizing s velikostí elementu 1 mm na plochách viz obrázek 9.5.



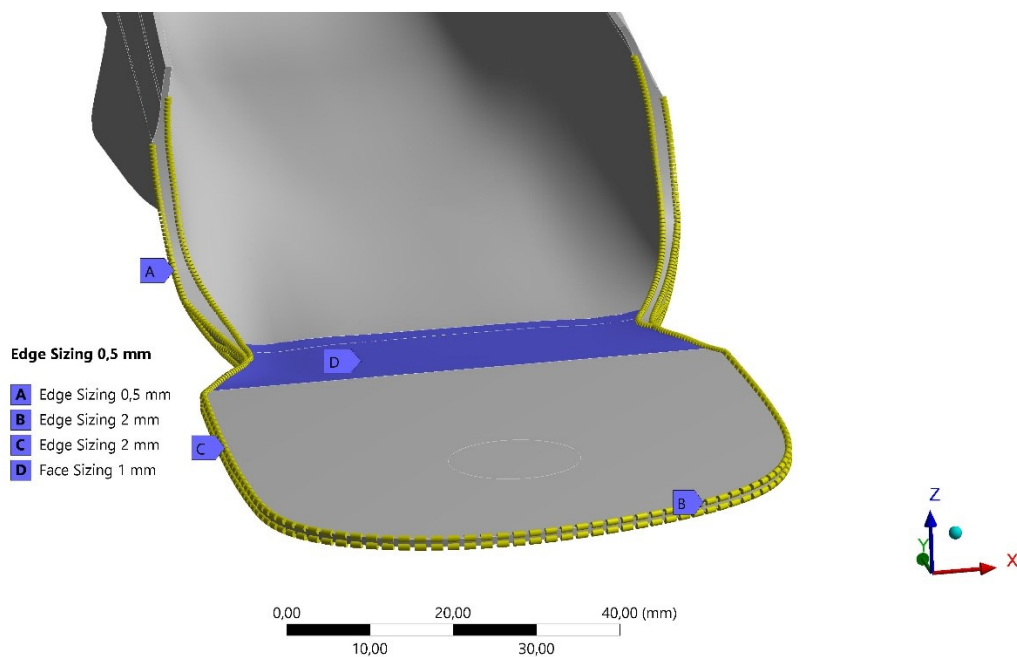
Obrázek 9.5 – Úprava nastavení sítě optimalizovaného modelu s vrubem



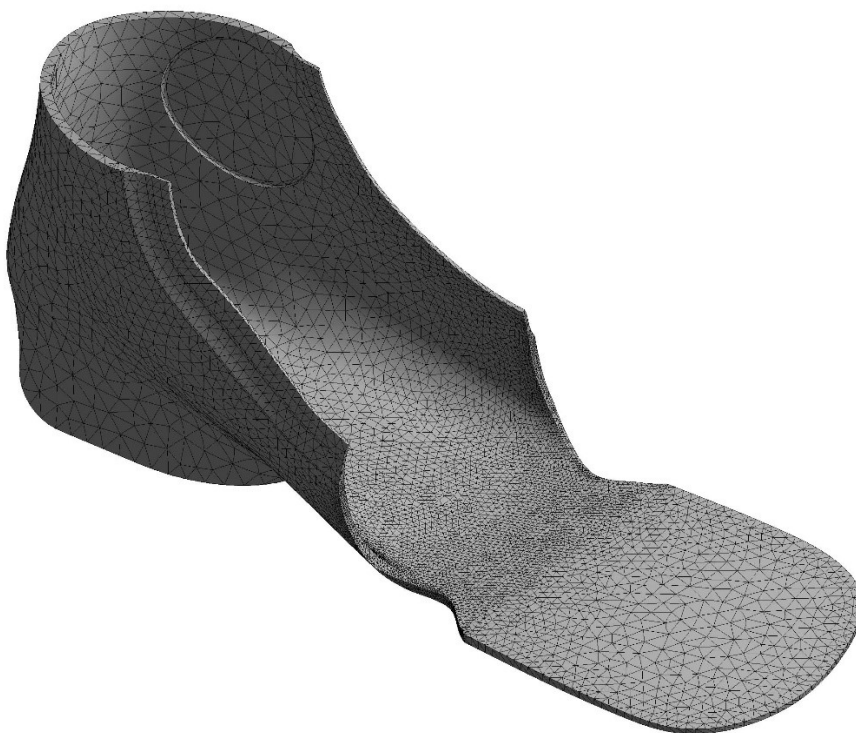
Obrázek 9.6 – Konečnoprvková sít' optimalizovaného modelu s vrubem

### 9.2.2 Optimalizovaný základní model

K úpravě sítě jsou použity stejné funkce, jako u předchozích modelů (Edge Sizing, Face Sizing), viz obrázek 9.7.



Obrázek 9.7 – Úprava nastavení sítě optimalizovaného základního modelu

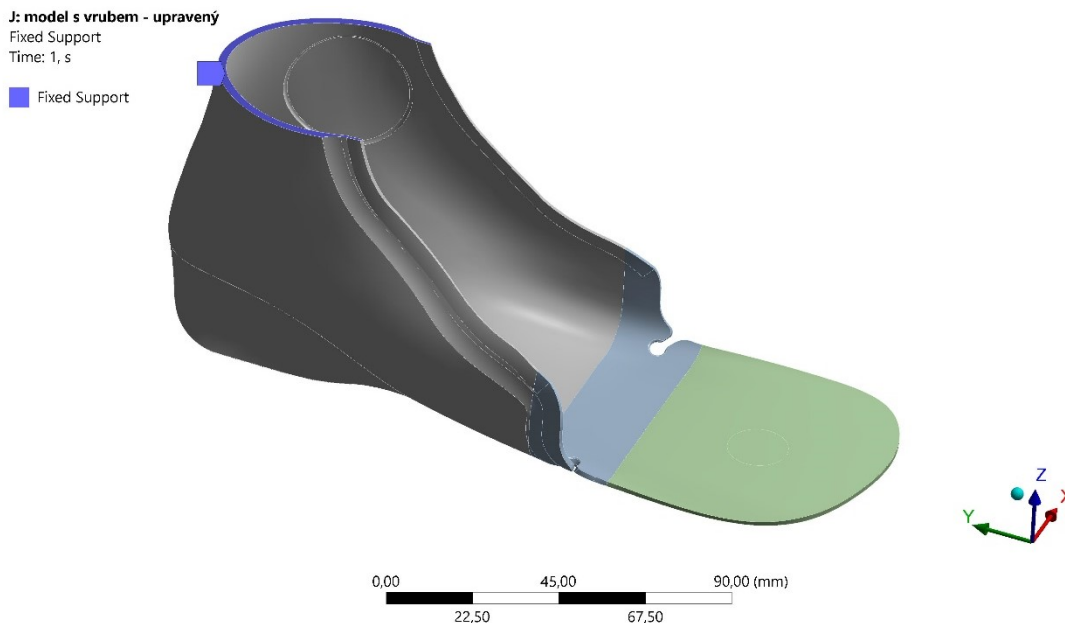


Obrázek 9.8 – Konečnoprvková síť optimalizovaného základního modelu

## 9.3 Okrajové podmínky

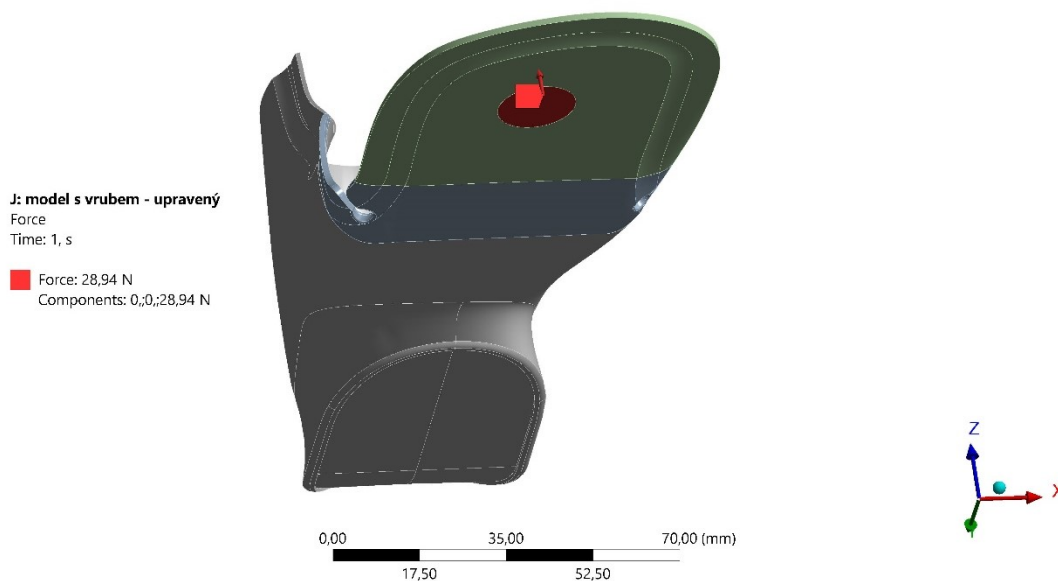
### 9.3.1 Optimalizovaný model s vrubem

Okrajové podmínky optimalizovaného modelu s vrubem jsou obdobné, jako u neupraveného modelu. K zamezení všech posuvů a rotací je použita vazba Fixed Support na horní ploše ortézy.



Obrázek 9.9 – Vazba Fixed Support

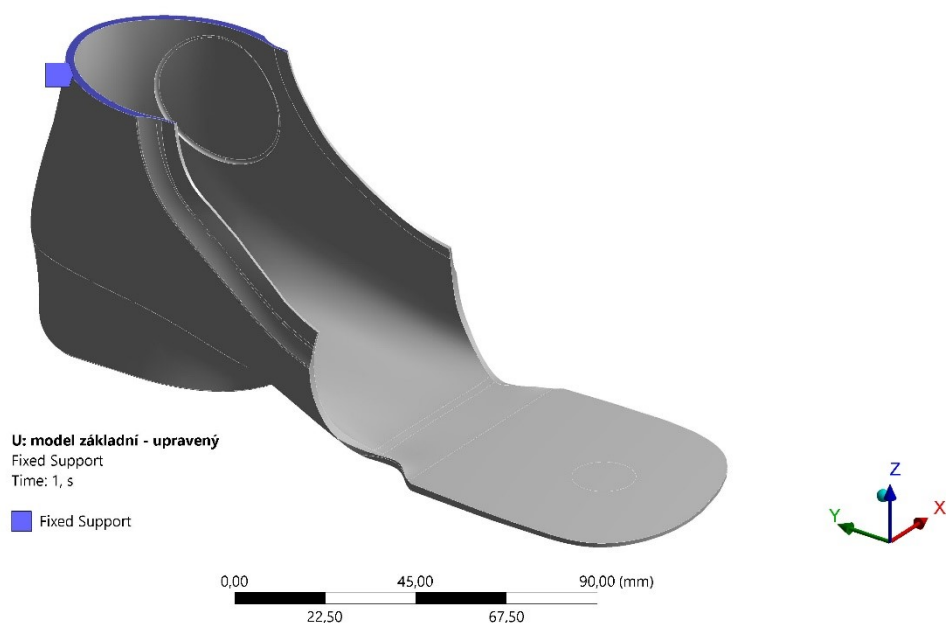
Dále je na model aplikováno zatížení ve formě síly. Síla je aplikována ve směru osy Z pomocí zatížení Force na plochu, která je vyznačená na obrázku níže. Ohybu o úhel  $45^\circ$  odpovídá síla 28,94 N. Síla je taktéž rozdělena do dvou zatěžujících kroků, obdobně jako u neupraveného modelu.



Obrázek 9.10 – Zatížení silou o velikosti 28,94 N

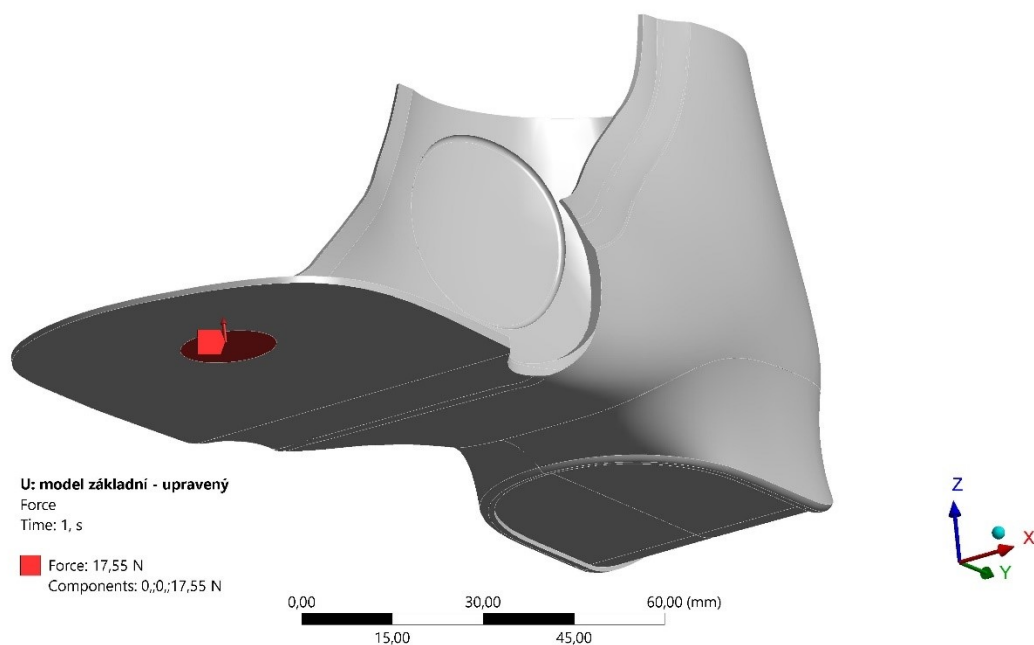
### 9.3.2 Optimalizovaný základní model

K zamezení všech posuvů a rotací je použita vazba Fixed Support na horní ploše ortézy.



Obrázek 9.11 – Vazba Fixed Support

Dále je na vybranou plochu aplikováno zatížení ve formě síly o velikosti 17,55 N ve směru osy Z. Síla je taktéž rozdělena do dvou zatěžujících kroků.



Obrázek 9.12 – Zatížení silou o velikosti 17,55 N

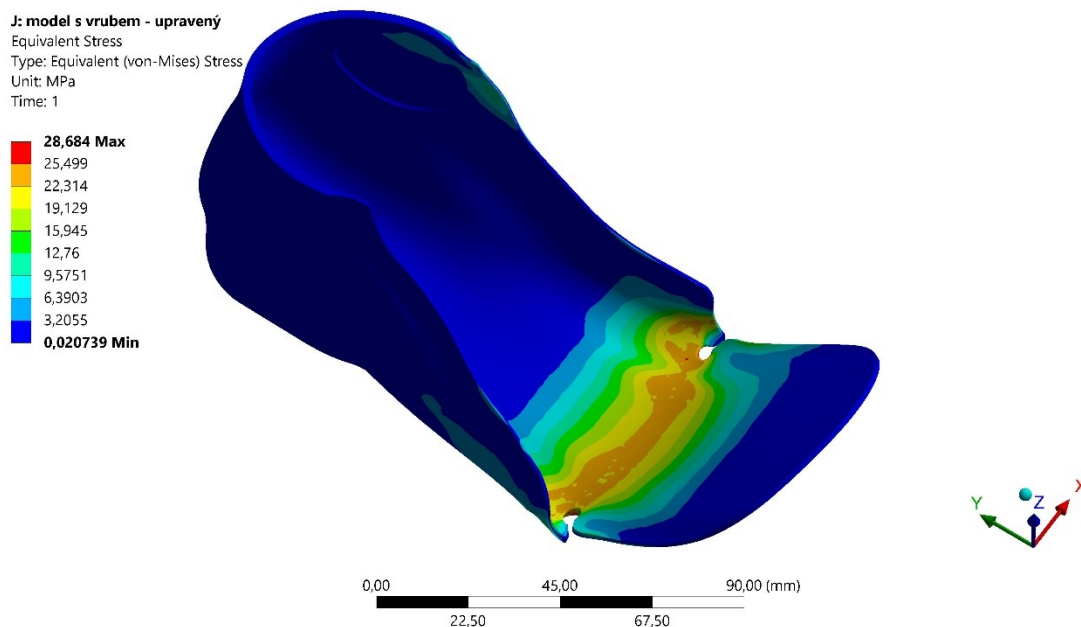
Nastavení výpočtů je stejné jako u neoptimalizovaných modelů v předchozí kapitole 7.6.

## 10 Výsledky pevnostní analýzy optimalizovaných modelů

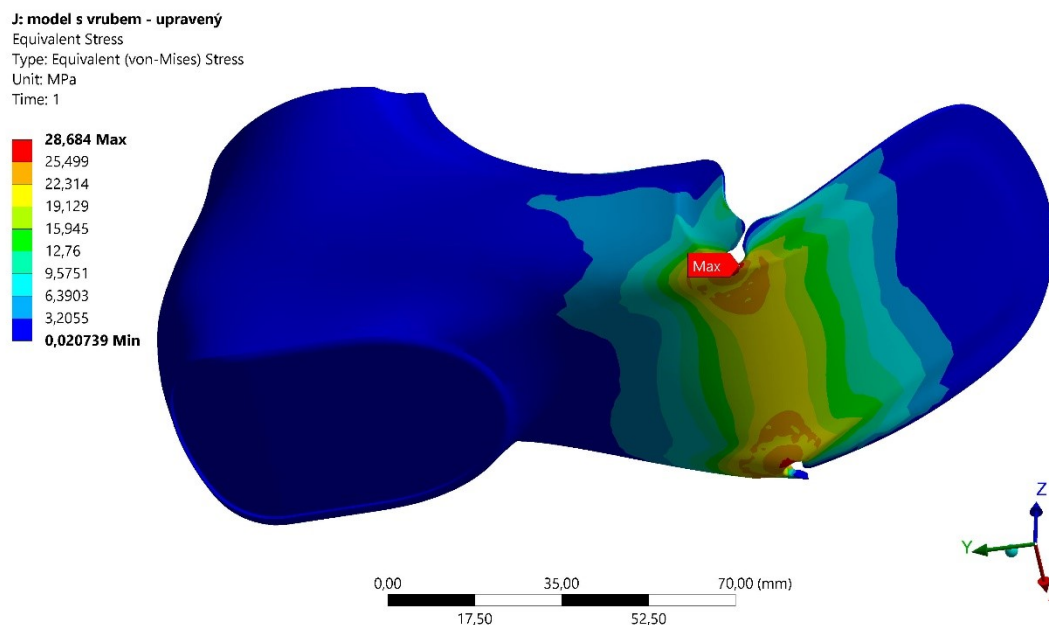
### 10.1 Optimalizovaný model s vrubem

#### 10.1.1 Redukované napětí

Na následujících obrázcích 10.1–10.3 je zobrazen průběh redukovaného napětí dle hypotézy HMH při zatížení silou 28,94 N.



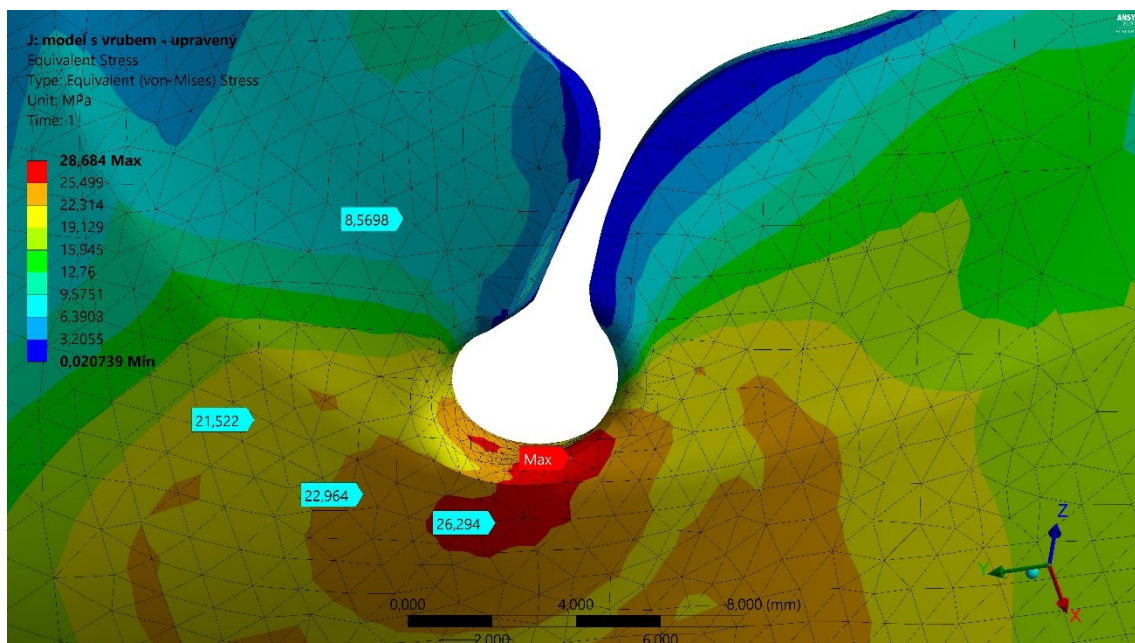
Obrázek 10.1 – Průběh redukovaného napětí dle hypotézy HMH na optimalizovaném modelu s vrubem



Obrázek 10.2 – Průběh redukovaného napětí dle hypotézy HMH na optimalizovaném modelu s vrubem



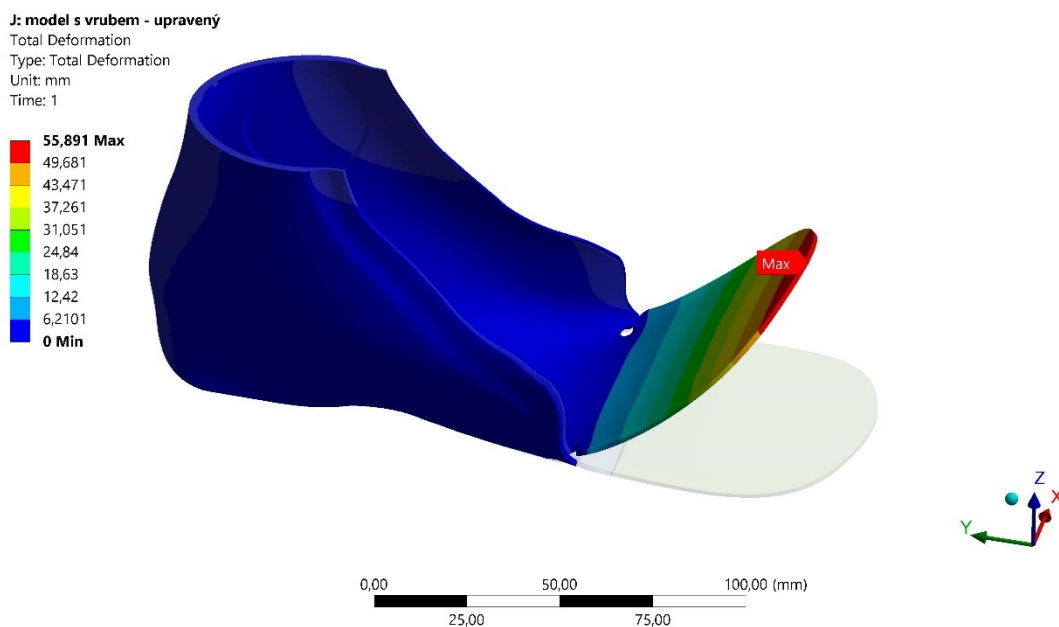
Na obrázku 10.3 lze vidět detail místa s nejvyšší hodnotou napětí, tedy 28,68 MPa.



Obrázek 10.3 – Detail místa s nejvyšší hodnotou redukovaného napětí

### 10.1.2 Posunutí při zatížení silou

Na obrázku 10.4 je vykresleno posunutí základního modelu na konci prvního kroku, kdy je přední část ortézy ohnuta o požadovaný úhel  $45^\circ$  a hodnota zatěžující síly je 28,94 N. Maximální hodnota posunutí je 55,89 mm.

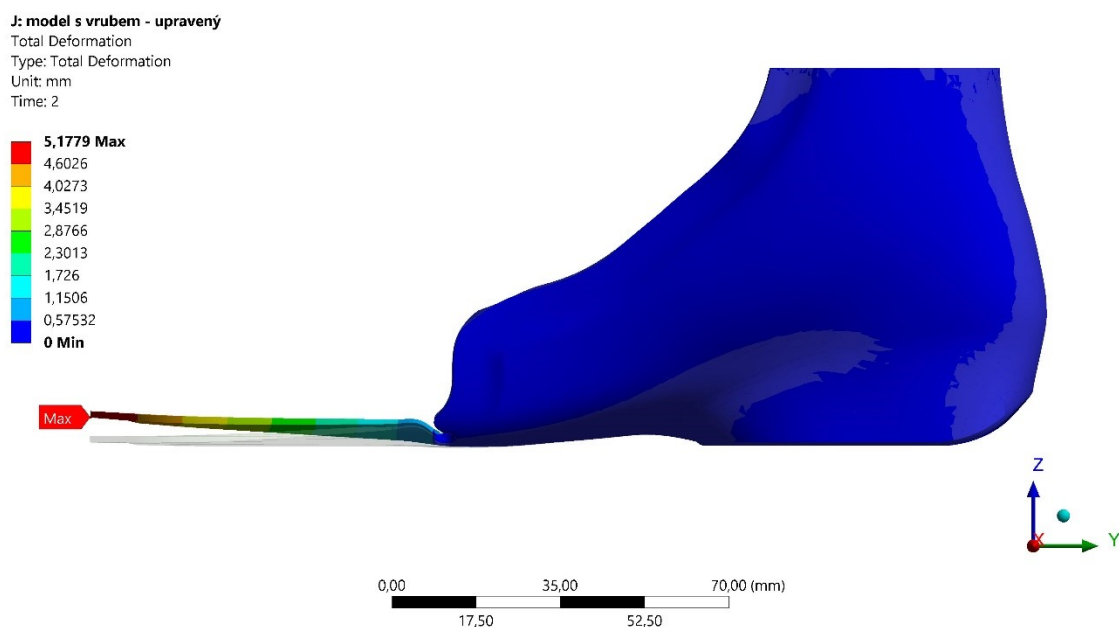


Obrázek 10.4 – Posunutí optimalizovaného modelu s vrubem při zatížení silou 28,94 N o 55,89 mm



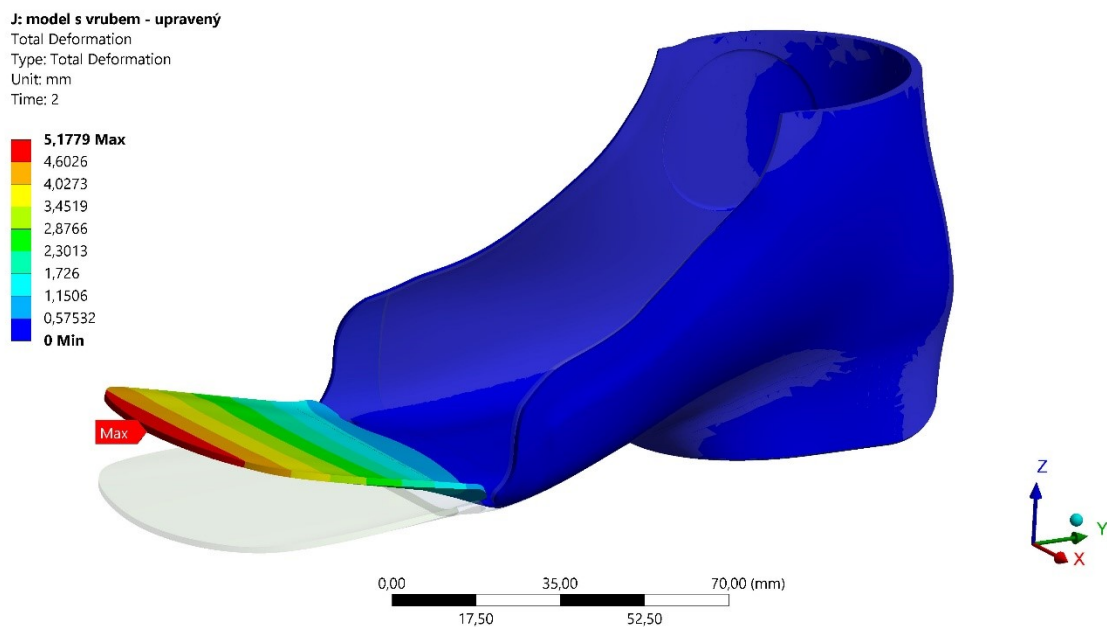
### 10.1.3 Posunutí při odlehčení

Na obrázku 10.5 je vykresleno posunutí modifikovaného modelu s vrubem na konci druhého kroku, kdy dojde k odlehčení modelu. Maximální hodnota posunutí po odlehčení je 5,18 mm v přední části ortézy.



Obrázek 10.5 – Posunutí optimalizovaného modelu s vrubem po odlehčení

Pro lepší přehlednost je na obrázku níže vykreslení posunutí 4x zvětšeno.

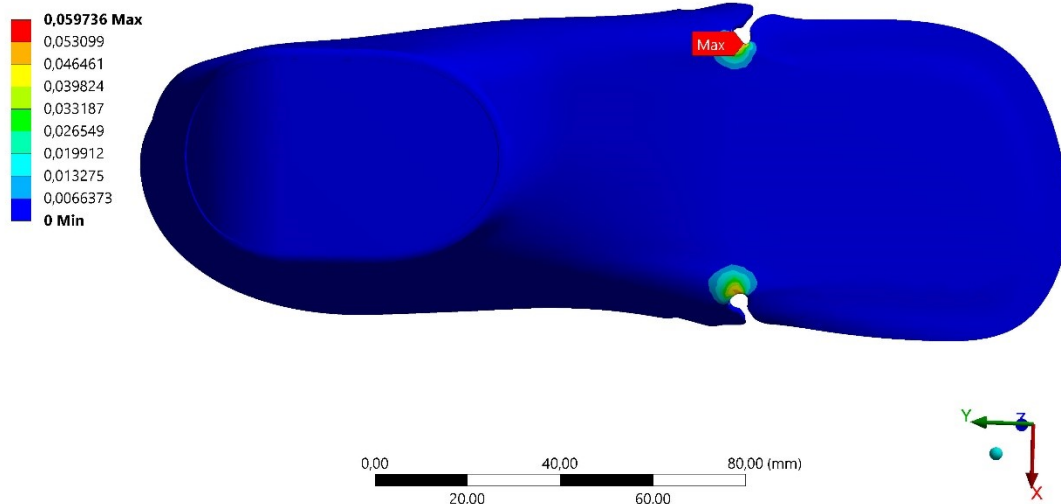


Obrázek 10.6 – Posunutí optimalizováno modelu s vrubem po odlehčení

#### 10.1.4 Plastická deformace

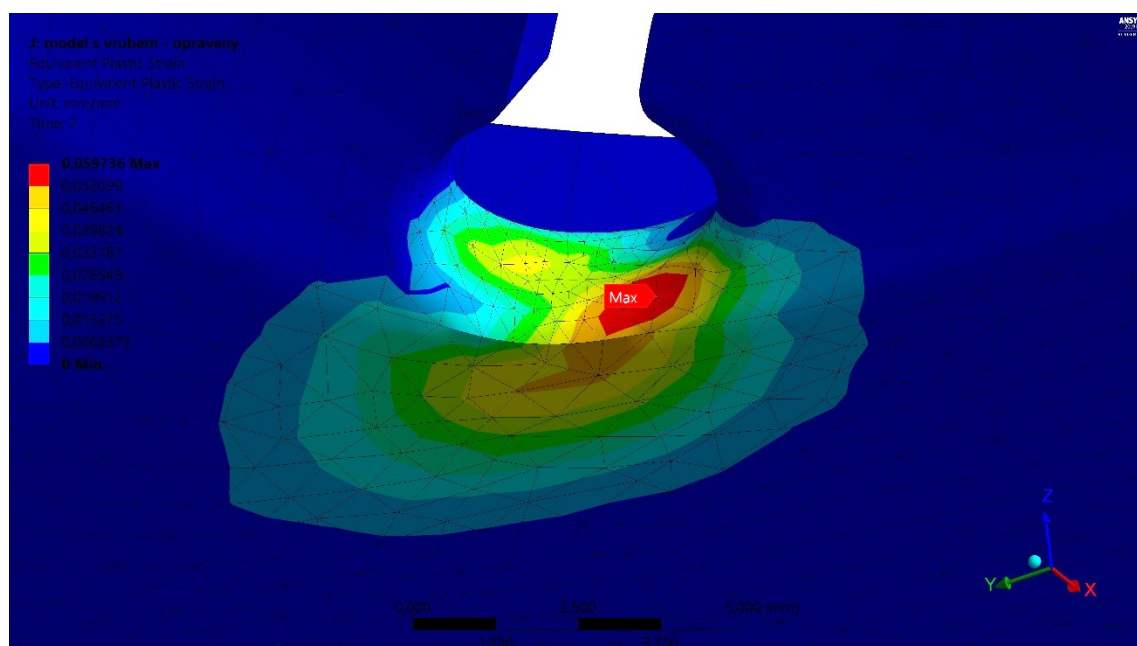
Na obrázku 10.7 a 10.8 je zobrazen průběh plastické deformace.

J: model s vrubem - upravený  
Equivalent Plastic Strain  
Type: Equivalent Plastic Strain  
Unit: mm/mm  
Time: 2



Obrázek 10.7 – Plastická deformace optimalizovaného modelu s vrubem

Na obrázku níže je zobrazen detail místa s nejvyšší hodnotou plastické deformace 0,0597.

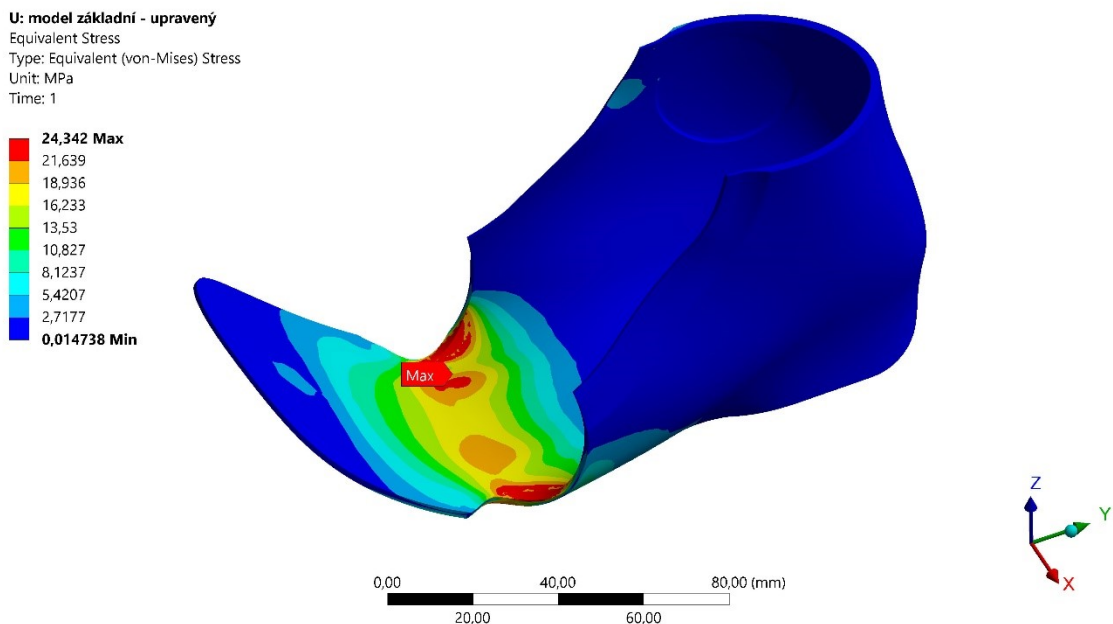


Obrázek 10.8 – Detail oblasti s nejvyšší hodnotou plastická deformace

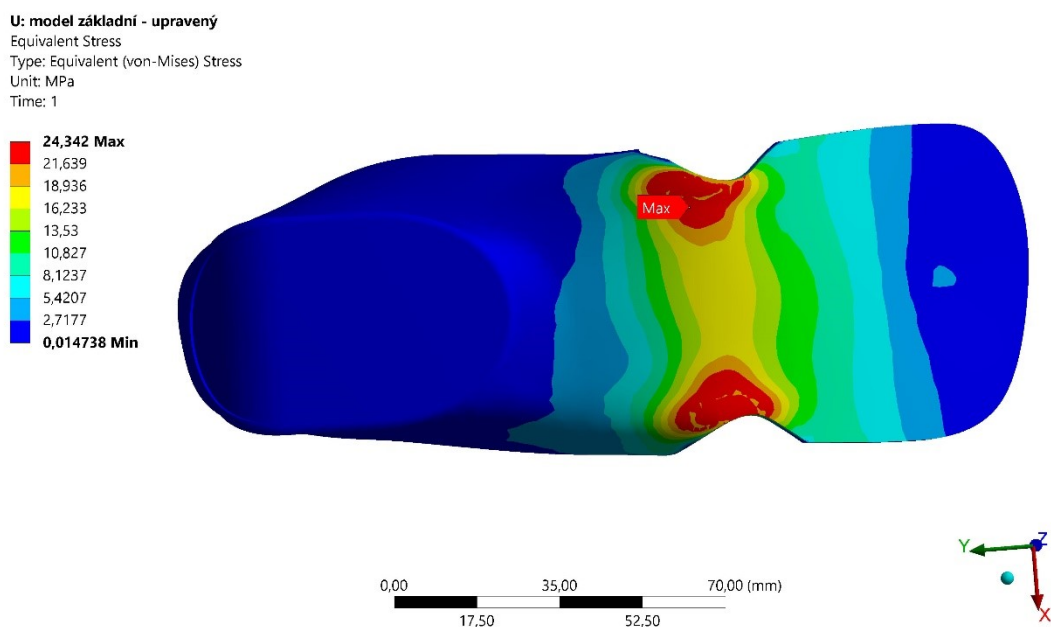
## 10.2 Optimalizovaný základní model

### 10.2.1 Redukované napětí

Na následujících obrázcích 10.9–10.11 je zobrazen průběh redukovaného napětí dle hypotézy HMH na optimalizovaném základním modelu zatíženém silou 17,55 N.

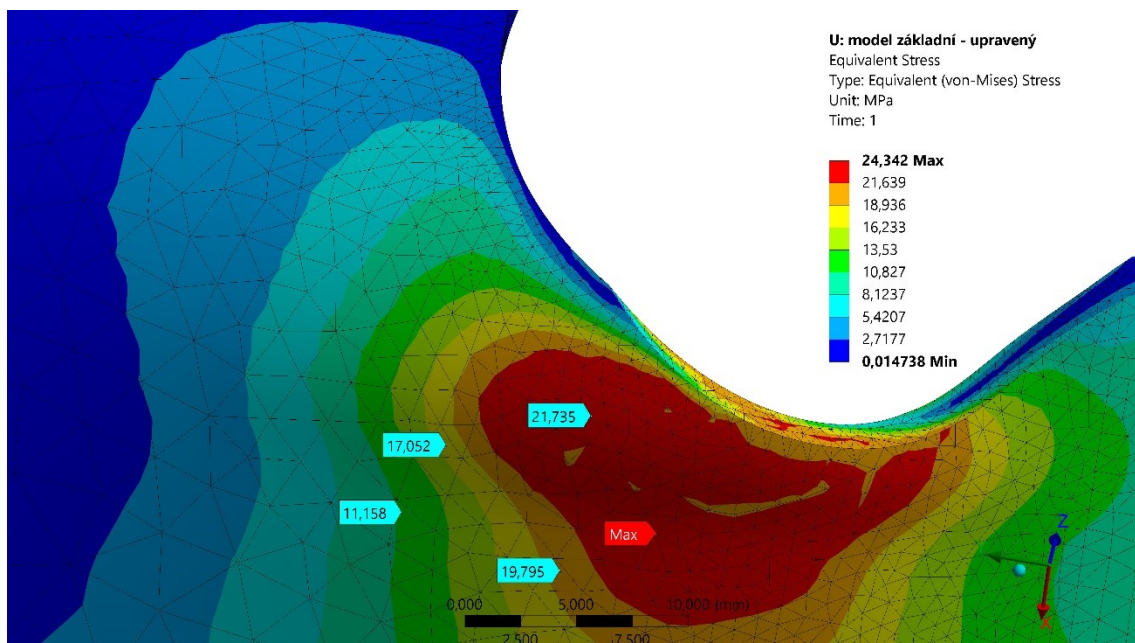


Obrázek 10.9 – Průběh redukovaného napětí dle hypotézy HMH na optimalizovaném základním modelu



Obrázek 10.10 – Průběh redukovaného napětí dle hypotézy HMH na optimalizovaném základním modelu

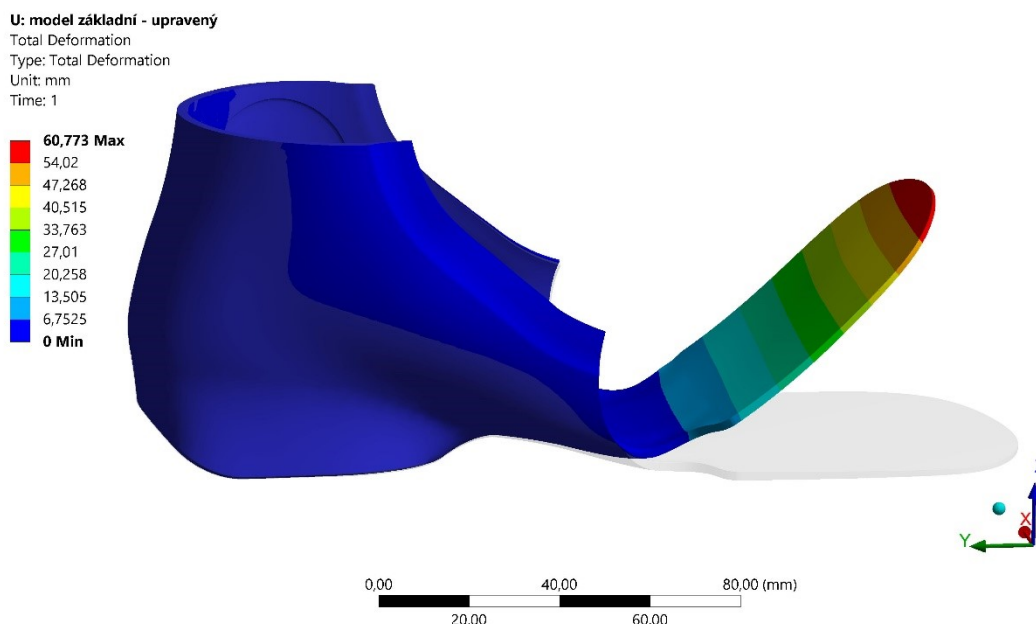
Na obrázku 10.11 lze vidět detail místa s nejvyšší hodnotou napětí, tedy 24,34 MPa.



Obrázek 10.11 – Detail místa s největší hodnotou redukovaného napětí

### 10.2.2 Posunutí při zatížení silou

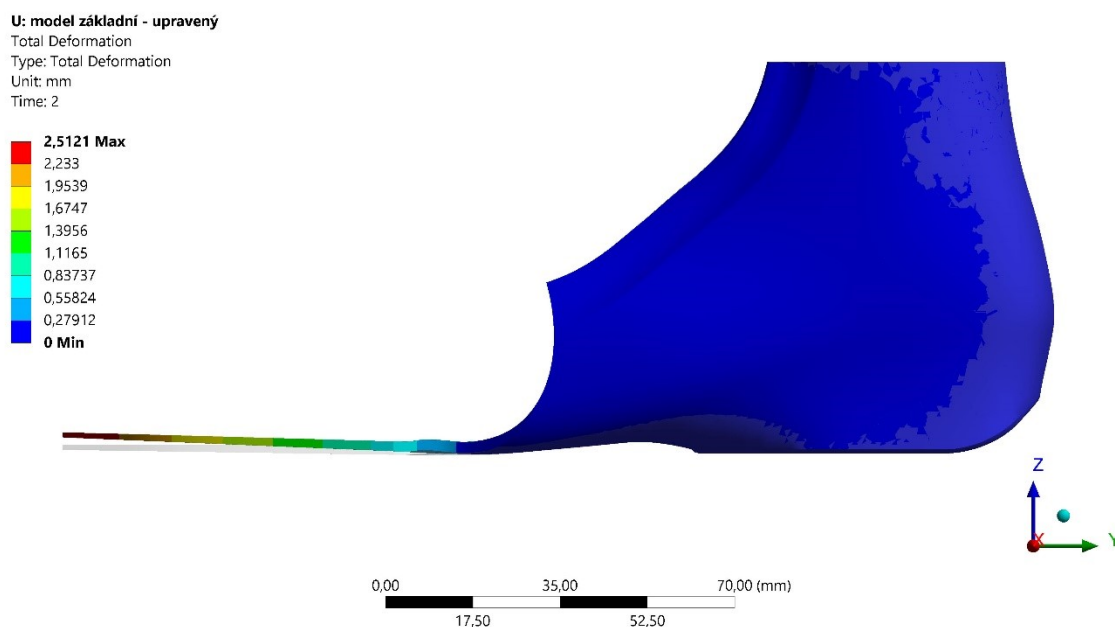
Na obrázku 10.12 je vykresleno posunutí modelu na konci prvního kroku, kdy je přední část ortézy ohnuta o požadovaný úhel  $45^\circ$  a hodnota zatěžující síly je 17,55 N. Maximální hodnota posunutí je 60,77 mm.



Obrázek 10.12 – Posunutí optimalizovaného základního modelu při zatížení silou 17,55 N o 60,77 mm

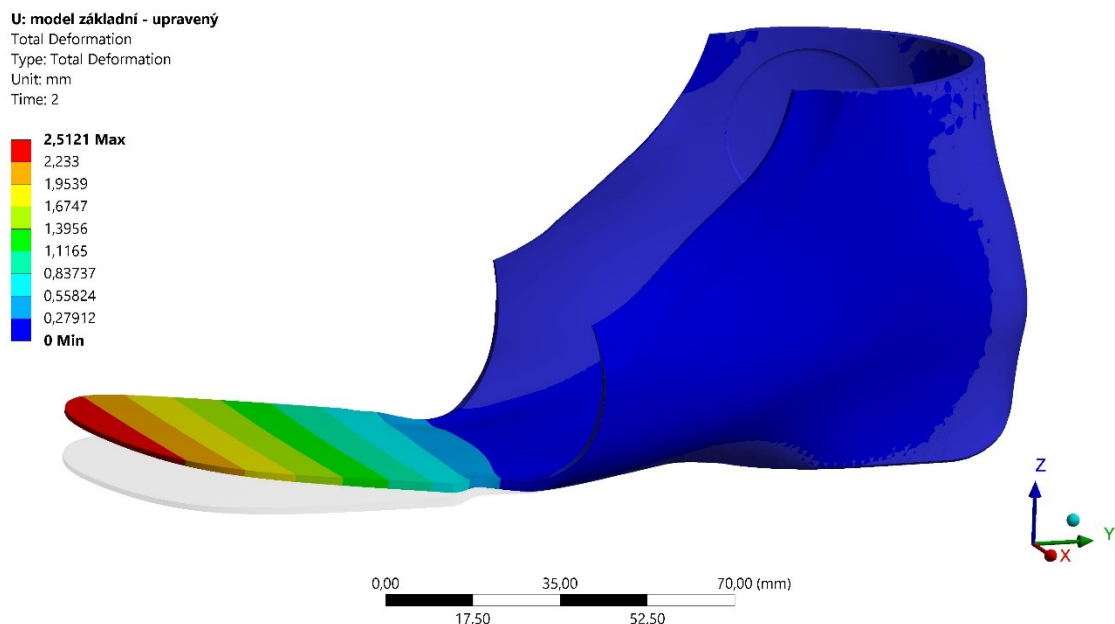
### 10.2.3 Posunutí po odlehčení

Na obrázku 10.13 je vykresleno posunutí optimalizovaného základního modelu na konci druhého kroku, kdy dojde k odlehčení modelu. Maximální hodnota posunutí po odlehčení je 2,51 mm v přední části ortézy.



Obrázek 10.13 – Posunutí optimalizovaného základního modelu po odlehčení

Pro lepší přehlednost je na obrázku níže vykreslení posunutí 4x zvětšeno.



Obrázek 10.14 – Posunutí optimalizovaného základního modelu po odlehčení

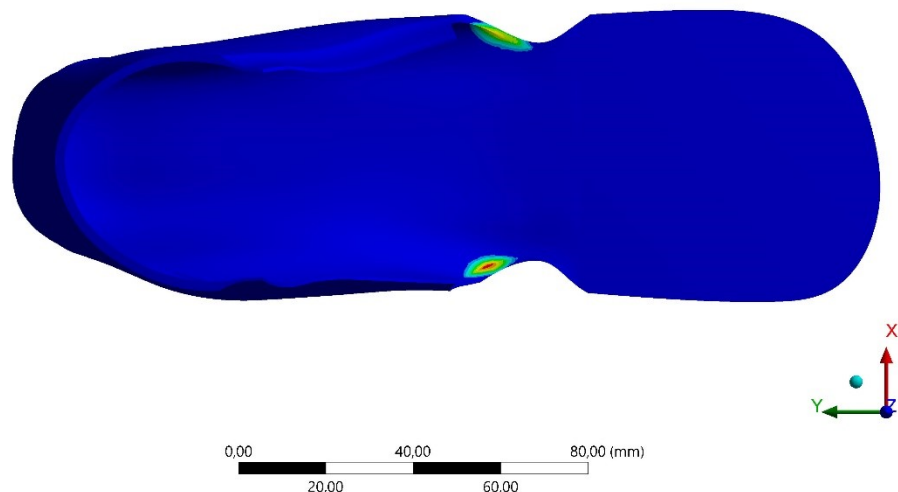


### 10.2.4 Plastická deformace

Na obrázku 10.15 a 10.16 je zobrazen průběh plastické deformace.

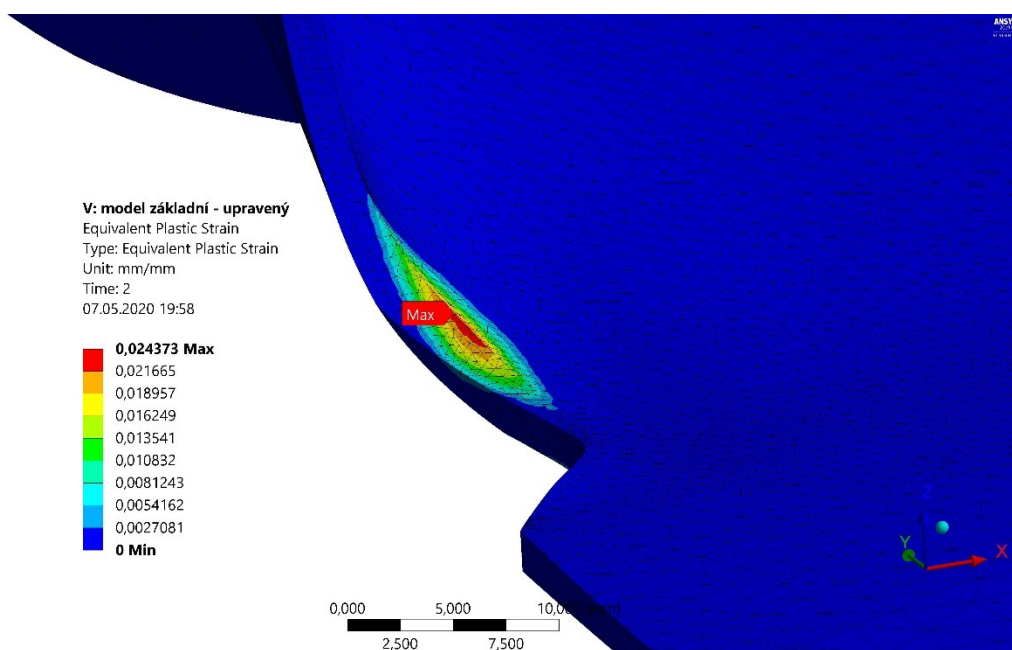
U: model základní - upravený  
Equivalent Plastic Strain  
Type: Equivalent Plastic Strain  
Unit: mm/mm  
Time: 2

0,024373 Max  
0,021665  
0,018957  
0,016249  
0,013541  
0,010832  
0,0081243  
0,0054162  
0,0027081  
0 Min



Obrázek 10.15 – Plastická deformace optimalizovaného základního modelu

Na obrázku níže je zobrazen detail místa s nejvyšší hodnotou plastické deformace 0,0244.



Obrázek 10.16 – Detail oblasti s nejvyšší hodnotou plastická deformace

## 11 Vyhodnocení optimalizace tvaru

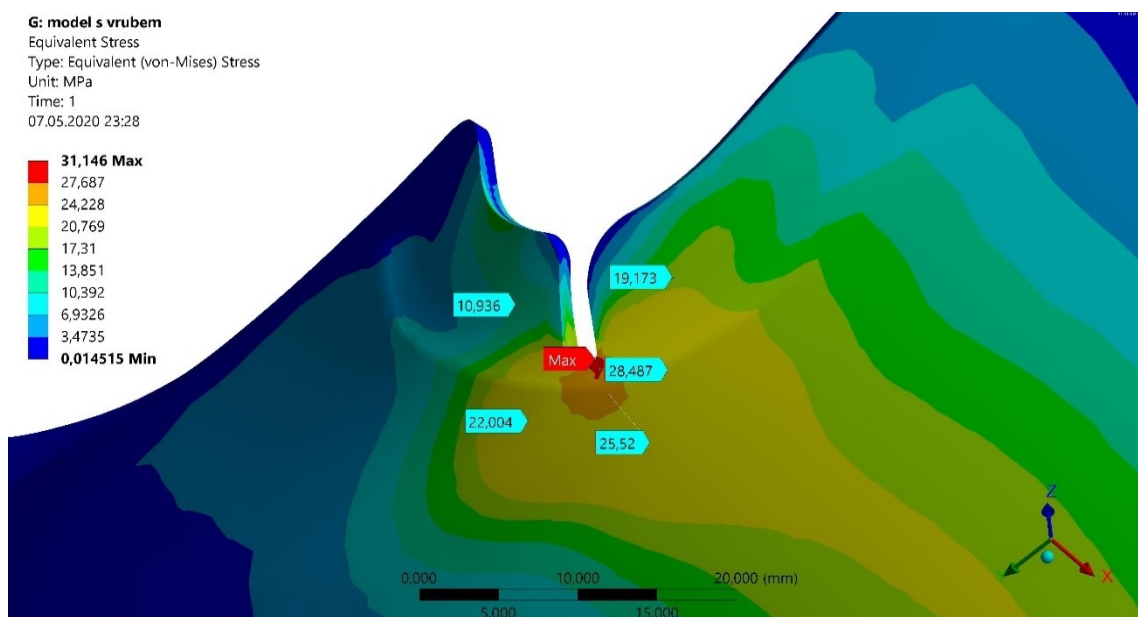
V této kapitole jsou porovnány hodnoty redukovaného napětí a plastické deformace u modelů ortéz před a po optimalizaci.

### 11.1 Model s vrubem

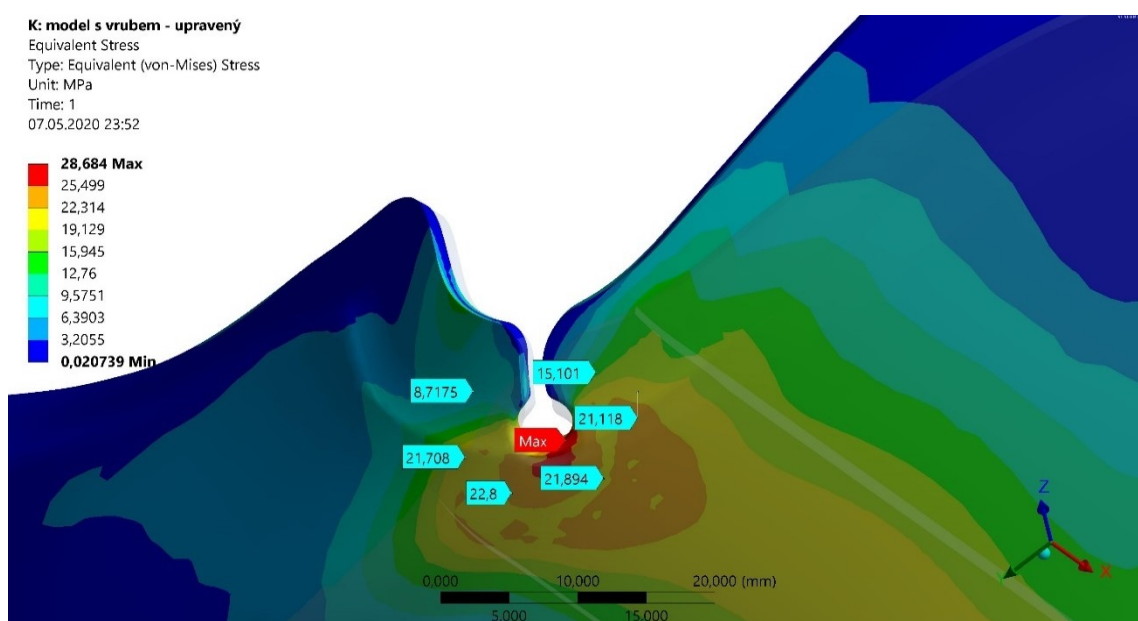
#### 11.1.1 Redukované napětí

Vyjádření snížení maximální hodnoty redukovaného napětí dle hypotézy HMH u modelu s vrubem před a po optimalizaci vztažené k původní hodnotě v procentech:

$$\Delta\sigma_{red\ vrub} = \frac{\sigma_{p\u00fuv} - \sigma_{opt}}{\sigma_{p\u00fuv}} \cdot 100 = \frac{31,15 - 28,68}{31,15} \cdot 100 = 7,93 \% \quad (11.1)$$



Obrázek 11.1 – Místo s nejvyšší hodnotou redukovaného napětí u modelu s vrubem před optimalizací



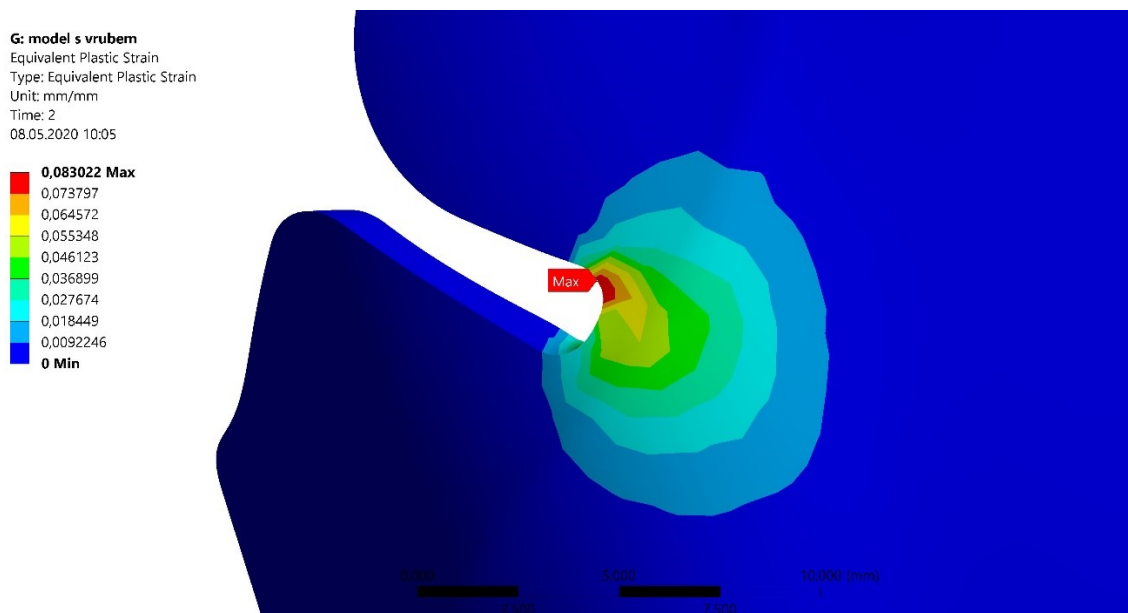
Obrázek 11.2 – Místo s nejvyšší hodnotou redukovaného napětí u modelu s vrubem po optimalizaci



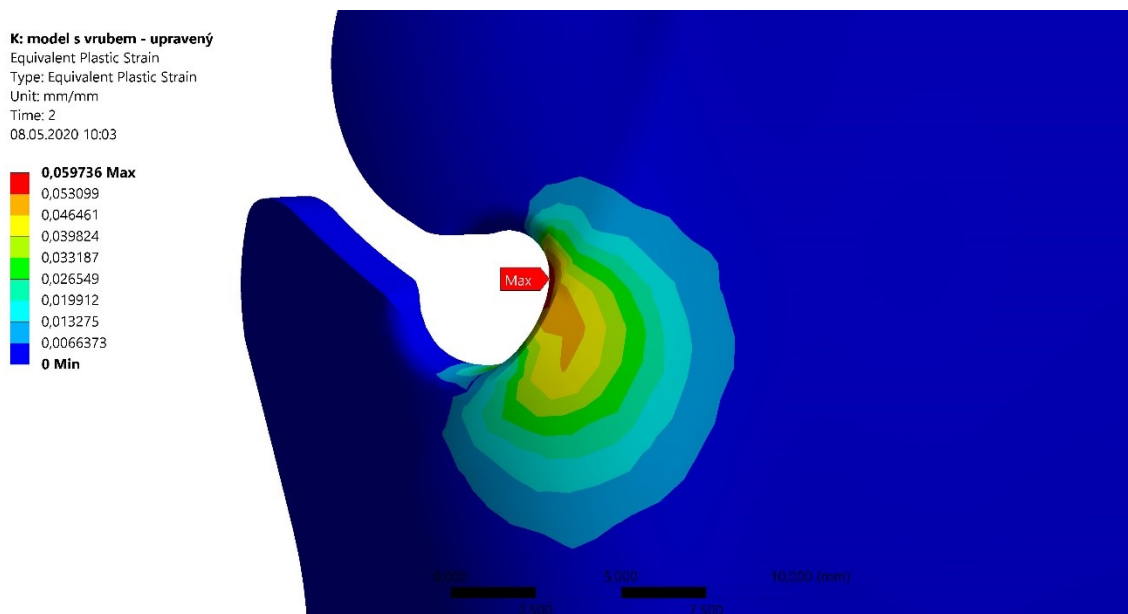
### 11.1.2 Plastická deformace

Vyjádření snížení maximální hodnoty plastické (trvalé) deformace u modelu s vrubem před a po optimalizaci vztažené k původní hodnotě v procentech:

$$\Delta \varepsilon_{pl\ vrub} = \frac{\varepsilon_{pl\ pův} - \varepsilon_{pl\ opt}}{\varepsilon_{pl\ pův}} \cdot 100 = \frac{0,083 - 0,0597}{0,083} \cdot 100 = 28,07 \% \quad (11.2)$$



Obrázek 11.3 – Detail místa s nejvyšší hodnotou plastické deformace u modelu s vrubem před optimalizací



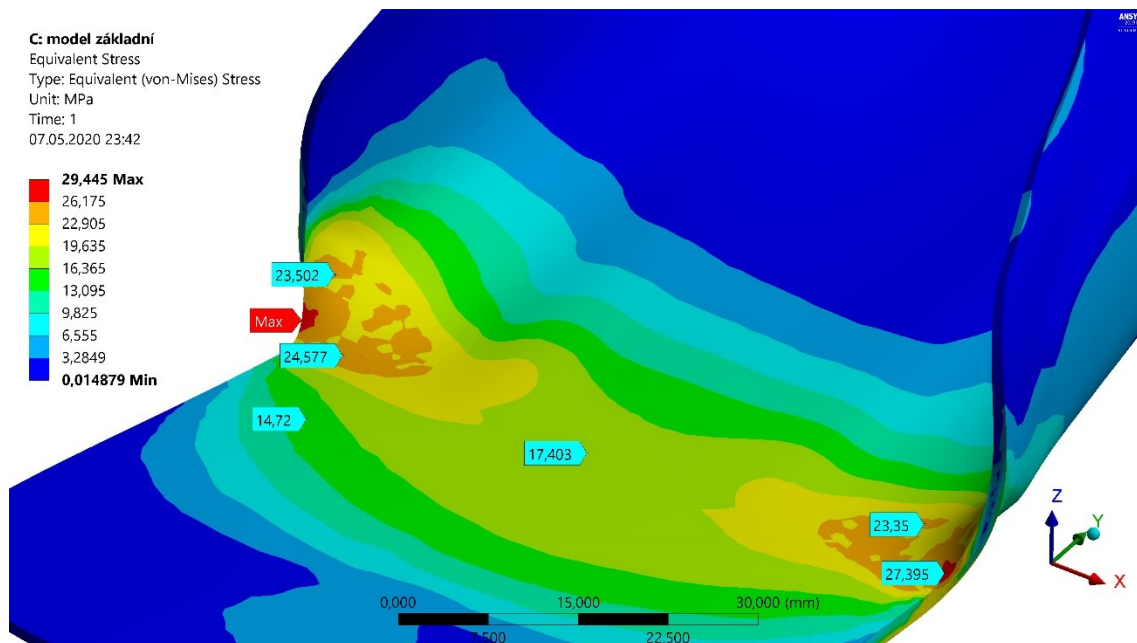
Obrázek 11.4 – Detail místa s nejvyšší hodnotou plastické deformace u modelu s vrubem po optimalizaci

## 11.2 Základní model

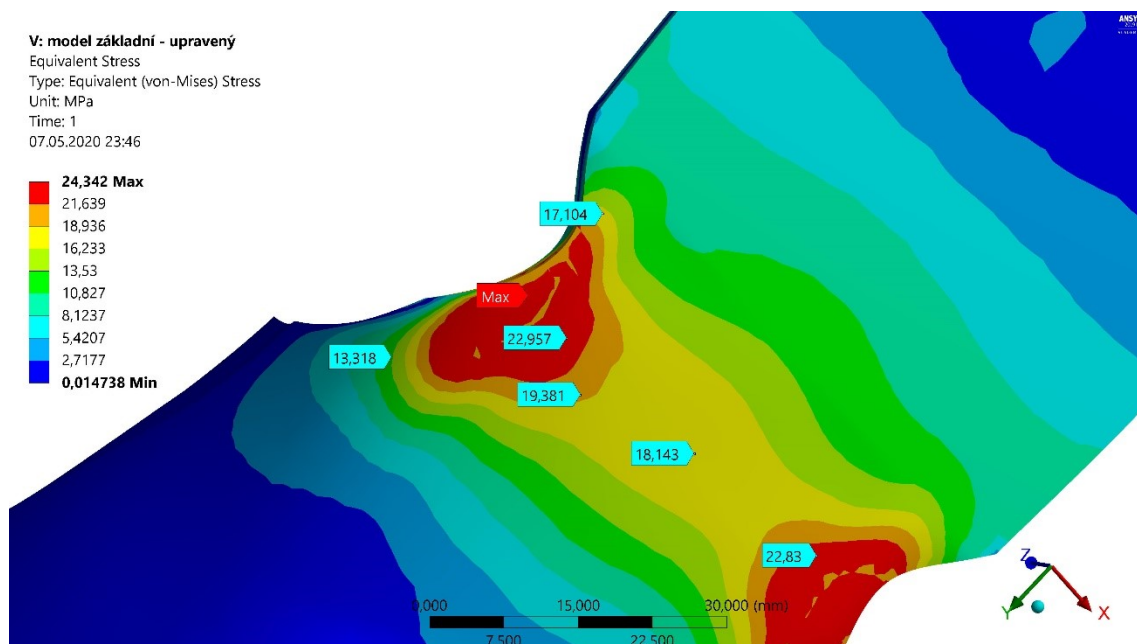
### 11.2.1 Redukované napětí

Vyjádření snížení maximální hodnoty redukovaného napětí dle hypotézy HMM u původního modelu před a po optimalizaci vztažené k původní hodnotě v procentech:

$$\Delta\sigma_{red} = \frac{\sigma_{p\u016f\u00f0v} - \sigma_{opt}}{\sigma_{opt}} \cdot 100 = \frac{29,45 - 24,34}{29,45} \cdot 100 = 17,35 \% \quad (11.3)$$



Obrázek 11.5 – Místo s nejvyšší hodnotou redukovaného napětí u základního modelu před optimalizací

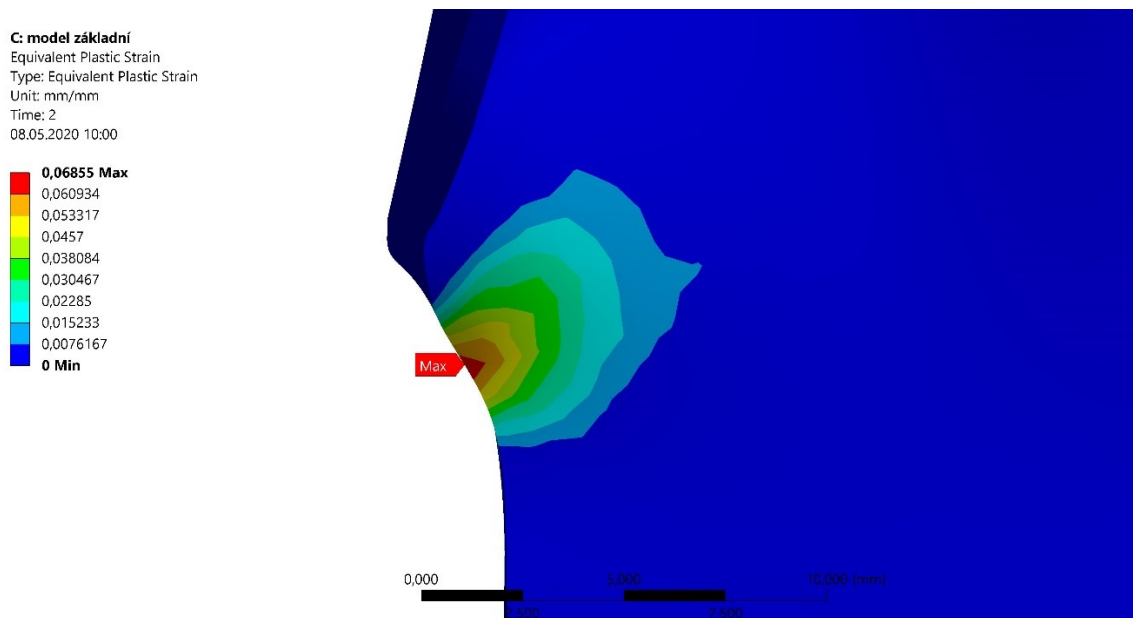


Obrázek 11.6 – Místo s nejvyšší hodnotou redukovaného napětí u základního modelu po optimalizaci

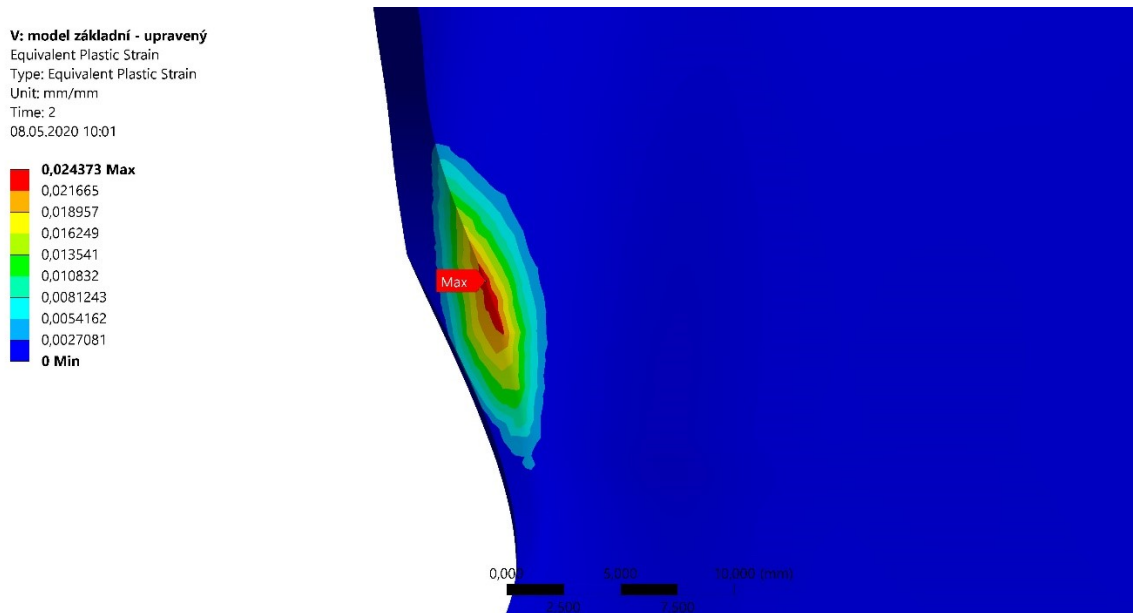
### 11.2.2 Plastická deformace

Vyjádření snížení maximální hodnoty plastické deformace u základního modelu před a po optimalizaci vztažené k původní hodnotě v procentech:

$$\Delta \varepsilon_{pl} = \frac{\varepsilon_{pl\ p\acute{u}v} - \varepsilon_{pl\ opt}}{\varepsilon_{pl\ p\acute{u}v}} \cdot 100 = \frac{0,0686 - 0,0244}{0,0686} \cdot 100 = 64,43 \% \quad (11.4)$$



Obrázek 11.7 – Detail místa s nejvyšší hodnotou plastické deformace u základního modelu před optimalizací



Obrázek 11.8 – Detail místa s nejvyšší hodnotou plastické deformace u základního modelu po optimalizaci

## 12 Přehled výsledků pevnostní analýzy

### 12.1 Základní přehled výsledků

V následující podkapitole je přehled všech výsledků získaných z pevnostní analýzy modelů ortopedické pomůcky Piro. Níže v tabulce 12.1 je přehled výsledků původních dodaných modelů před optimalizací.

Tabulka 12.1 Přehled výsledků pevnostní analýzy dodaných geometrických modelů

	Základní model	Model s vrubem
Redukované napětí dle HMH [MPa]	29,45	31,15
Posunutí zatíženého modelu [mm]	51,57	55,58
Posunutí odlehčeného modelu [mm]	3,87	5,48
Plastická deformace [1]	0,0686	0,0830

V následující tabulce 12.2 je přehled výsledků modelů po optimalizaci.

Tabulka 12.2 Přehled výsledků pevnostní analýzy optimalizovaných geometrických modelů

	Základní model po optimalizaci	Model s vrubem po optimalizaci
Redukované napětí dle HMH [MPa]	24,32	28,68
Posunutí zatíženého modelu [mm]	60,77	55,89
Posunutí odlehčeného modelu [mm]	2,51	5,18
Plastická deformace [1]	0,0244	0,0597

V následující tabulce 12.3 je přehled snížení maximální hodnoty redukovaného napětí a plastické deformace u základního modelu a modelu s vrubem před a po optimalizaci vztahované k původní hodnotě v procentech.

Tabulka 12.3 Výsledky optimalizace

	Základní model	Model s vrubem
$\Delta\sigma_{red}$ [%]	17,35	7,93
$\Delta\varepsilon_{pl}$ [%]	64,43	28,07

### 12.2 Zhodnocení výsledků

Jak vyplývá z obrázků zobrazující oblast s nejvyšší hodnotou napětí u každého modelu, maximální napětí je rozloženo na oblasti definované řadou konečnoprvkových elementů, nejedná se tedy i lokální koncentraci a přítomnost tohoto napětí lze tedy hodnotit jako reálné. Z přehledu výsledků pevnostní analýzy dodaných i optimalizovaných modelů plyne, že u všech modelů dochází k překročení meze kluzu (21 MPa) a po odlehčení zůstává plastická deformace (model se nevrací zpět do původní polohy) v nejméně exponovaném místě v přechodu mezi spodní a boční částí modelů ortézy. Zároveň nedochází k překročení meze pevnosti (40 MPa) a k lomu ortézy.

## 13 Závěr

Bakalářská práce se zabývá přehledem technologií 3D tisku, testováním vzorků vytištěných technologií 3D tisku HP Multi Jet Fusion z materiálu PA11 a následnou pevnostní analýzou ortopedické pomůcky, kde byly využity materiálové vlastnosti získané z testování materiálu.

Teoretická část práce představila historii a nejpoužívanější technologie 3D tisku současnosti, mezi které patří technologie FDM, SLS, SLA a HP Multi Jet Fusion. Vzhledem k tomu, že neexistuje technologie vhodná k výrobě všech typů výrobků, je při návrhu výrobku vyrobeného technologií 3D tisku důležité znát principy jednotlivých technologií. U každé technologie byl popsán proces tisku, přehled nejčastěji používaných materiálů, dokončovací operace a výhody a nevýhody dané technologie. Následuje stručný popis méně používaných technologií, parametrů uvažovaných při výběru použité technologie a přípravy modelu k tisku.

V druhé části bakalářské práce bylo provedeno zjištění mechanických vlastností materiálu PA11, který je v rámci technologie 3D tisku velmi často používán. Jako první byla popsána zkouška tahem, která byla dále využita ke zjištění požadovaných mechanických vlastností. Cílem testování bylo ověřit, zda mechanické vlastnosti uváděné výrobcem materiálu odpovídají skutečným hodnotám. Testované vzorky byly vytištěny tiskárnou HP Jet Fusion 4200. K testování bylo vybráno 9 vzorků vytištěných ve 3 polohách.

Výsledkem tahové zkoušky jsou mechanické vlastnosti dále používané pro pevnostní kontrolu, tedy mez kluzu  $R_e$ , mez pevnosti  $R_m$ , Youngův modul  $E$  a tečný modul  $E_t$ . Výrobce udává, že materiál je izotropní, tedy má ve všech směrech stejné mechanické vlastnosti (mez pevnosti  $R_m$  50 MPa, Youngův modul  $E$  1800 MPa).

Z výsledků tahové zkoušky vyplývá, že mez pevnosti zkoušených vzorků se pohybuje v rozmezí od 40 MPa do 53 MPa a Youngův modul od 1138 MPa do 1554 MPa. Nejvyšší hodnotu meze pevnosti a Youngova modulu vykazují vzorky, které byly při tisku orientované kolmo na rovinu tiskové podložky. Následně byla zkoumána struktura lomové plochy zkoušených vzorku pod mikroskopem. Ze snímků z mikroskopu vyplývá, že materiál není ve svém objemu homogenní a dochází k nepravidelnému výskytu pórů, které mohou negativně ovlivnit mechanické vlastnosti testovaného materiálu.

V třetí části bakalářské práce byla provedena pevnostní analýza metodou konečných prvků ortopedické pomůcky Piro od firmy Invent Medical. Jedná se o dětskou ortézu, která je díky využití technologie 3D tisku lehká, tenká a má příjemný vzhled.

Pevnostní analýza byla realizována na základě reálného experimentu v programu ANSYS Workbench. Nejprve byla provedena analýza dvou dodaných geometrických modelů (základní model a model s vrubem), které byly upraveny tak, aby výpočetní čas a náročnost na hardware byla přijatelná, ale zároveň nedošlo k ovlivnění výsledků.

V dalším kroku došlo k optimalizaci obou modelů. Výsledkem optimalizace je snížení redukovaného napětí u modelu s vrubem o 7,93 % a plastické deformace o 28,07 %. U základního modelu bez vrubu došlo k snížení redukovaného napětí o 17,35 % a plastické deformace o 64,43 %.

Z pevnostní analýzy původních i optimalizovaných modelů vyplývá, že u všech modelů dochází k překročení meze kluzu a po odlehčení zůstává plastická deformace v nejvíce exponovaném místě v přechodu mezi spodní a boční částí modelů ortézy. Zároveň ale nedochází k překročení meze pevnosti a lomu.

## **Poděkování**

Ráda bych touto cestou vyjádřila poděkování doc. Ing. Zdeňkovi Porubovi, Ph.D za jeho odborné vedení, cenné rady, doporučení a trpělivost při vedení mé bakalářské práce.



## 14 Seznam použité literatury

- [1] History of 3D Printing: When Was 3D Printing Invented? | All3DP. *All3DP | World's #1 3D Printing Magazine* [online]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/history-of-3d-printing-when-was-3d-printing-invented/>
- [2] Discover the history of 3D printer. [online]. Copyright © 2009 [cit. 27.02.2020]. Dostupné z: <https://www.sculpteo.com/blog/2017/03/01/whos-behind-the-three-main-3d-printing-technologies/>
- [3] The Free Beginner's Guide – 3D Printing Industry. *3D Printing Industry-The Authority on 3D Printing & Additive Manufacturing* [online]. Copyright © Copyright 2017 [cit. 27.02.2020]. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide>
- [4] STRÍTESKÝ, Ondřej, Josef PRŮŠA a Martin BACH. Základy 3D tisku s Josefem Průšou [online]. Praha: Prusa Research, 2019 [cit. 2020-02-27]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/wpcontent/uploads/zaklady-3d-tisku.pdf>
- [5] 3D TISK, PRINCIPY, TECHNOLOGIE. *3D tiskárna, 3D tiskárny - ABC 3D* [online]. Copyright © 2014 [cit. 27.02.2020]. Dostupné z: <https://www.abc3d.cz/o-3d-tisku-neprehlednete/115-3d-tisk-principy-technologie>
- [6] Most used 3D printing technologies 2017-2018 | Statista. • *Statista – The Statistics Portal for Market Data, Market Research and Market Studies* [online]. Copyright © Statista 2020 [cit. 27.02.2020]. Dostupné z: <https://www.statista.com/statistics/560304/worldwide-survey-3d-printing-top-technologies/>
- [7] *3D Hubs | On-demand Manufacturing: Quotes in Seconds, Parts in Days* [online]. Copyright © 2020 3D HUBS B.V. All rights reserved. [cit. 28.02.2020]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-fdm-3d-printing/#what>
- [8] GOODSHIP, Vannessa, Bethany MIDDLETON a Ruth CHERRINGTON. *Design and manufacture of plastic components for multifunctionality: structural composites, injection molding, and 3D printing*. Amsterdam: William Andrew, [2016]. ISBN 978-032-3340-618.
- [9] 3D Printing Infill: The Basics – Simply Explained | All3DP. *All3DP | World's #1 3D Printing Magazine* [online]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/infill-3d-printing-what-it-means-and-how-to-use-it/>
- [10] *O mně - Josef Prusa - 3D tisk a tiskárny Josef Prusa – 3D tisk a tiskárny* [online]. Dostupné z: <https://josefprusa.cz/vse-o-tryskach-s-ruzny-m-prumerem>
- [11] Polymaker's new 3D printing support material: PolySupport - 3Dfabprint. *3D fab+print community - 3Dfabprint* [online]. Copyright © 3D fab [cit. 28.02.2020]. Dostupné z: <https://3dfabprint.com/polymakers-new-3d-printing-support-material-polysupport/>
- [12] FDM 3D Printing Post-Processing: An Overview for Beginners | All3DP. *All3DP | World's #1 3D Printing Magazine* [online]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/fdm-3d-printing-post-processing-an-overview-for-beginners/>
- [13] Ultimate Guide to Painting 3D Prints | MakerBot 3D Printers. *3D Printers for Educators & Professionals | MakerBot* [online]. Copyright © 2009 [cit. 28.02.2020]. Dostupné z: <https://www.makerbot.com/professional/post-processing/painting/>

- [14] 11 Things to Consider When Choosing Your First or Next Desktop 3D Printer. *My3Dconcepts.com - 3D Printing - Education, Architecture & 3D Art* [online]. Copyright © Copyright 2017 [cit. 28.02.2020]. Dostupné z: <http://my3dconcepts.com/explore/main-components-of-desktop-3d-printers/>
- [15] Rozdíl mezi ABS, PLA a PETG. *Materiály a doplňky pro 3D tisk – filamenty - Materialpro3d.cz* [online]. Copyright © Materialpro3d.cz, všechna práva vyhrazena [cit. 28.02.2020]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/blog/rozdily-abs-pla-petg/>
- [16] MakerBot 1.75mm PLA Filament (Large Spool, 10-Pack) MP06572 B&H. *B&H Photo Video Digital Cameras, Photography, Camcorders* [online]. Copyright © 2000 [cit. 28.02.2020]. Dostupné z: [https://www.bhphotovideo.com/c/product/1070383-REG/makerbot\\_mp06572\\_1\\_75mm\\_pla\\_filament\\_large.html](https://www.bhphotovideo.com/c/product/1070383-REG/makerbot_mp06572_1_75mm_pla_filament_large.html)
- [17] ABS – 3D-tisk.cz. *3D-tisk.cz - Vše o 3D tisku a aditivní výrobě* [online]. Copyright © 2019 [cit. 28.02.2020]. Dostupné z: <https://www.3d-tisk.cz/abs/>
- [18] PLA vs. ABS: Getting Value out of Low-Cost Prototyping. *Fictiv | On-Demand Manufacturing* [online]. Dostupné z: <https://www.fictiv.com/blog/posts/pla-vs-abs-getting-value-out-of-low-cost-prototyping>
- [19] Verbatim BVOH Blanc – Boutique en ligne 3DJake France. *Boutique en ligne 3DJake France | Vente d'Imprimantes 3D, Filaments & Accessoires* [online]. Copyright © 2010 [cit. 28.02.2020]. Dostupné z: <https://www.3djake.fr/verbatim/bvoh-blanc>
- [20] FDM (Fused Filament Fabrication) | cotu.cz. *3D tisk, výroba prototypů a sériová výroba | cotu.cz* [online]. Copyright © 2020 [cit. 28.02.2020]. Dostupné z: <https://www.cotu.cz/blog/134/fdm-fused-filament-fabrication>
- [21] Stereolitografie – 3D-tisk.cz. *3D-tisk.cz - Vše o 3D tisku a aditivní výrobě* [online]. Copyright © 2019 [cit. 28.02.2020]. Dostupné z: <https://www.3d-tisk.cz/stereolitografie/>
- [22] 3D Hubs | On-demand Manufacturing: *Quotes in Seconds, Parts in Days* [online]. Copyright © 2020 3D HUBS B.V. All rights reserved. [cit. 28.02.2020]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-sla-3d-printing/#what>
- [23] BÁRTOLO, Paulo. *Stereolithography: Materials, Processes and Applications*. New York: Springer, [2011]. ISBN 978-0-387-92903-3.
- [24] Laser SLA vs DLP vs Masked SLA 3D Printing Technology - The Ortho Cosmos. *The Ortho Cosmos - Open peer-reviewed publications, orthodontic news, knowledge, and discussion* [online]. Copyright © The Ortho Cosmos [cit. 28.02.2020]. Dostupné z: <https://theorthocosmos.com/laser-sla-vs-dlp-vs-masked-sla-3d-printing-technology-compared/>
- [25] *Rapid Prototyping & Manufacturing: Fundamentals of Stereolithography*. California: Society of Manufacturing Engin, 1992. ISBN 0-87263-425-6.
- [26] How to post-process SLA / DLP / LCD printed objects. *The best 3D printing resins for SLA, DLP and LCD printing - Liqcreate* [online]. Copyright © 2020 Liqcreate. All Rights Reserved. Read our [cit. 28.02.2020]. Dostupné z: <https://www.liqcreate.com/supportarticles/how-to-post-process-sla-dlp-lcd-printed-objects/>
- [27] Myci a vytvrzovací stanice (CW1) - Prusa Research. [online]. Copyright © Prusa Research a.s. [cit. 28.02.2020]. Dostupné z: <https://shop.prusa3d.com/cs/prislusenstvi/720-myci-a-vytvrzovaci-stanice-cw1.html>

- [28] *PBcom CNC obrábění | CNC obrábění, frézování, soustružení a programování CNC strojů* [online]. Copyright © [cit. 28.02.2020]. Dostupné z: <https://www.pb-com.cz/soubor.php?id=23>
- [29] *The Wait is Over | Formlabs. High Resolution SLA and SLS 3D Printers for Professionals | Formlabs* [online]. Copyright © Formlabs [cit. 28.02.2020]. Dostupné z: <https://formlabs.com/blog/wait-over/>
- [30] *Grey Pro Resin - 3D Compare Materials. 3D Printing Services | 3D Printing Company | Online 3D Printing - 3DCompare.com* [online]. Dostupné z: <https://3dcompare.com/materials/product/grey-pro-resin/>
- [31] *3D tisk fotopolymerizací | cotu.cz. 3D tisk, výroba prototypů a sériová výroba | cotu.cz* [online]. Copyright © 2020 [cit. 28.02.2020]. Dostupné z: <https://www.cotu.cz/blog/151/3d-tisk-fotopolymerizaci>
- [32] *The Ultimate Guide to Stereolithography (SLA) 3D Printing | Formlabs. High Resolution SLA and SLS 3D Printers for Professionals | Formlabs* [online]. Copyright © Formlabs [cit. 28.02.2020]. Dostupné z: <https://formlabs.com/blog/ultimate-guide-to-stereolithography-sla-3d-printing/>
- [33] *Selective Laser Sintering - 3D-tisk.cz. 3D-tisk.cz - Vše o 3D tisku a aditivní výrobě* [online]. Copyright © 2019 [cit. 28.02.2020]. Dostupné z: <https://www.3d-tisk.cz/selective-laser-sintering/>
- [34] *Selective Laser Sintering (SLS) – 3D Printing Process – Tajagna Youth Club.* [online]. Dostupné z: <https://tajagna-youthclub.com/2019/04/11/selective-laser-sintering-sls-3d-printing-process/tajagna/4619/>
- [35] BOURELL, David L., Trevor J. WATT, David K. LEIGH a Ben FULCHER. Performance Limitations in Polymer Laser Sintering. *Physics Procedia* [online]. 2014, 56, 147-156 [cit. 2020-02-28]. DOI: 10.1016/j.phpro.2014.08.157. ISSN 18753892. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1875389214003022>
- [36] *Post processing for SLS printed parts | 3D Hubs. 3D Hubs | On-demand Manufacturing: Quotes in Seconds, Parts in Days* [online]. Copyright © 2020 3D HUBS B.V. All rights reserved. [cit. 28.02.2020]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/post-processing-sls-printed-parts/>
- [37] *Introduction to SLS 3D Printing | 3D Hubs. 3D Hubs | On-demand Manufacturing: Quotes in Seconds, Parts in Days* [online]. Copyright © 2020 3D HUBS B.V. All rights reserved. [cit. 28.02.2020]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-sls-3d-printing/>
- [38] *Guide to Selective Laser Sintering (SLS) 3D Printing | Formlabs. High Resolution SLA and SLS 3D Printers for Professionals | Formlabs* [online]. Copyright © Formlabs [cit. 28.02.2020]. Dostupné z: <https://formlabs.com/blog/what-is-selective-laser-sintering/#how-sls-works>
- [39] *Laser Sintering SLS | 3D Printing Technologies & Materials. Redirecting to https://www.materialise.com/en* [online]. Copyright © Copyright Materialise [cit. 28.02.2020]. Dostupné z: <https://www.materialise.com/cs/manufacturing/technologie-materialy-a-dokoncovaci-upravy/laserove-sintrovani>
- [40] *Alumide Material | Fabb-It 3D Druckservise. Fabb-It 3D Druck Service | Privat, Gewerbe und Industrie* [online]. [cit. 28.02.2020]. Dostupné z: <https://www.fabb-it.de/material/details?material=alumide>

- [41] SLS (Selective Laser Sintering) | cotu.cz. *3D tisk, výroba prototypů a sériová výroba* | cotu.cz [online]. Copyright © 2020 [cit. 28.02.2020]. Dostupné z: <https://www.cotu.cz/blog/126/sls-selective-laser-sintering>
- [42] SELECTIVE LASER SINTERING – earlstewart. [online]. [cit. 28.02.2020]. Dostupné z: <http://cargocollective.com/earlstewart/SELECTIVE-LASER-SINTERING>
- [43] MJF (Multi Jet Fusion) | cotu.cz. *3D tisk, výroba prototypů a sériová výroba* | cotu.cz [online]. Copyright © 2020 [cit. 20.04.2020]. Dostupné z: <https://www.cotu.cz/blog/138/mjf-multi-jet-fusion>
- [44] NUOVA HP MULTI JET FUSION 4200 - GOCCIA DOPO GOCCIA... - justprint3d. *Stampa 3D multimateriale e Prototipazione rapida - JustPrint3D Modena* [online]. Dostupné z: <https://www.justprint3d.it/nuova-hp-multi-jet-fusion-4200-goccia-goccia/>
- [45] Hewlett Packard Introduces Multi Jet Fusion 3D-Printing Technologie - 3Printr.com. *3Printr. com - The Magazine for 3D Print Technologies* [online]. Copyright © 3Printr.com [cit. 20.04.2020]. Dostupné z: <https://www.3printr.com/hewlett-packard-introduces-multi-jet-fusion-3d-printing-technologie-5222136/>
- [46] Liberečtí vědci testují nové materiály pro 3D tisk | Technický týdeník. *TT | Technický týdeník* [online]. Copyright © Business Media CZ Nádražní 32, 150 [cit. 20.04.2020]. Dostupné z: [https://www.technickytydenik.cz/rubriky/veda-vyzkum-inovace/liberecti-vedci-testuji-nove-materialy-pro-3d-tisk\\_48931.html](https://www.technickytydenik.cz/rubriky/veda-vyzkum-inovace/liberecti-vedci-testuji-nove-materialy-pro-3d-tisk_48931.html)
- [47] The First 3D Prints of the HP Jet Fusion 4200 3D Printer | 3D Printing Blog | i.materialise. [online]. Copyright © Copyright 2020 Materialise [cit. 20.04.2020]. Dostupné z: <https://i.materialise.com/blog/en/first-hp-jet-fusion-4200-3d-prints/>
- [48] HP Jet Fusion vs. Laser Sintering. *3faktur* [online]. [cit. 2020-04-20]. Dostupné z: <https://3faktur.com/en/hp-jet-fusion-vs-laser-sintering/#1503561589320-b0810c94-b2a3>
- [49] HP MJF vs. SLS Comparison. *3D Hubs* [online]. Copyright © 2020 3D HUBS B.V. All rights reserved. [cit. 20.04.2020]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/hp-mjf-vs-sls-3d-printing-technology-comparison/#appearance>
- [50] Multi Jet Fusion | MJF | 3D Printing at Materialise. [online]. Copyright © Copyright Materialise [cit. 20.04.2020]. Dostupné z: <https://www.materialise.com/en/manufacturing/3d-printing-technology/multi-jet-fusion>
- [51] Přehled technologií 3D tisku | dkmp Nový Jičín, Ostrava. *Kovovýroba, 3D tisk, konstrukce, vývoj* | dkmp Nový Jičín, Ostrava [online]. Copyright © [cit. 28.02.2020]. Dostupné z: <http://www.dkmp.cz/o-nas/detail/Prehled-technologie-3D-tisku>
- [52] PolyJet | 3D Printing Technologies & Materials. *Redirecting to https://www.materialise.com/en* [online]. Copyright © Copyright Materialise [cit. 28.02.2020]. Dostupné z: <https://www.materialise.com/cs/manufacturing/technologie-materialy-a-dokoncovaci-upravy/polyjet>
- [53] PolyJet – 3D Printing Technologies Simply Explained | All3DP. *All3DP | World's #1 3D Printing Magazine* [online]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/polyjet-3d-printing-technologies-simply-explained/>

- [54] LOM (Laminated Object Manufacturing): 3D Printing with Layers of Paper. [online]. Copyright © 2009 [cit. 28.02.2020]. Dostupné z: <https://www.sculpteo.com/en/glossary/lom-definition/>
- [55] What is Laminated Object Manufacturing? | 3D Printing | Live Science. *Live Science: The Most Interesting Articles, Mysteries & Discoveries* [online]. Copyright © [cit. 28.02.2020]. Dostupné z: <https://www.livescience.com/40310-laminated-object-manufacturing.html>
- [56] What Is Binder Jetting? – 3D Printing Simply Explained | All3DP. *All3DP | World's #1 3D Printing Magazine* [online]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/what-is-binder-jetting-3d-printing-simply-explained/>
- [57] 3D tisk kovu v sériové výrobě od HP | 3Dees. *Centrum 3D tisku Praha – výhradní dodavatelé 3D tiskáren HP | 3Dees* [online]. Dostupné z: <https://www.3dees.cz/blog/289-3d-tisk-kovu-v-seriove-vyrobe>
- [58] Introduction to Binder Jetting 3D printing | 3D Hubs. *3D Hubs | On-demand Manufacturing: Quotes in Seconds, Parts in Days* [online]. Copyright © 2020 3D HUBS B.V. All rights reserved. [cit. 28.02.2020]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-binder-jetting-3d-printing/>
- [59] JORDAN, John. *3D printing*. Cambridge: The MIT Press, 2018. ISBN 9780262536684.
- [60] GIBSON, I., D. W. ROSEN a B. STUCKER. *Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping and direct digital manufacturing*. Second edition. London: Springer, [2015]. ISBN 14-939-2112-6.
- [61] HORVATH, Joan C. *Mastering 3D printing: Modeling, Printing, and Prototyping with RepRap-style 3D Printers*. Berkeley, California: Apress, [2014]. Technology in action series. ISBN 978-1-4842-0026-1.
- [62] Releases · prusa3d/PrusaSlicer · GitHub. *The world's leading software development platform · GitHub* [online]. Copyright © 2020 GitHub, Inc. [cit. 28.02.2020]. Dostupné z: <https://github.com/prusa3d/PrusaSlicer/releases>
- [63] UMI FS ČVUT | Ústav materiálového inženýrství [online]. Copyright ©w [cit. 08.03.2020]. Dostupné z: [http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/08/3\\_2\\_\\_struktura-a-vlastnostni-materialu-a-jejich-zkouseni.pdf](http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/08/3_2__struktura-a-vlastnostni-materialu-a-jejich-zkouseni.pdf)
- [64] Mechanické vlastnosti polymerů – statické namáhání. [cit. 08.03.2020]. [online]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/09.html>
- [65] HALAMA, Radim, František FOJTÍK, Martin FUSEK, Jaroslav ROJÍČEK a Ludmila ADÁMKOVÁ. *Vlastnosti a zkoušení materiálů*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2013. ISBN 978-80-248-3027-8.
- [66] HAMERNÍK, Jan. *Vlastnosti kovových materiálů a jejich zkoušení: Zkoušky mechanických vlastností* [online]. [cit. 2020-03-08]. Dostupné z: <http://jhamernik.sweb.cz/vlastnosti.htm>
- [67] Zkoušky plastů dle ISO 527-2 | JD Dvořák - Zkušební technika. *JD Dvořák, s.r.o. - Zkušební technika* [online]. Copyright © [cit. 08.03.2020]. Dostupné z: <https://www.testsysteme.cz/iso-527-2-stanoveni-tahovych-vlastnosti-tvarenych-plastu>
- [68] 3D tisk-Online – MATERIÁLY – 3D Tisk Brno, Online odhad ceny. *3D tisk-Online – Home – 3D Tisk Brno, Online odhad ceny* [online]. Copyright © 2020 [cit. 08.03.2020]. Dostupné z: <https://www.3dtisk-online.cz/3d-tisk-brno-prehled-materialu-pro-3d/>

- [69] DOWLING, Norman E. *Mechanical behavior of materials: engineering methods for deformation, fracture, and fatigue*. 4th ed. Boston: Pearson, 2013. ISBN 01-313-9506-8.
- [70] PA 11, Rilsan, Arkema - Resinex. *Resinex - Distribuce plastů a kaučuků* [online]. Copyright © 2020 RESINEX Group, Czech Republic [cit. 08.03.2020]. Dostupné z: <https://www.resinex.cz/produkty/rilsan.html>
- [71] *Centrum 3D tisku Praha - výhradní dodavatelé 3D tiskáren HP | 3Dees* [online]. Copyright © [cit. 08.03.2020]. Dostupné z: <https://www.3dees.cz/images/pdf/HP-JET-FUSION-PA11-CZ.pdf>
- [72] 3D tiskárna HP rozšiřuje nové možnosti výroby ortetických pomůcek | 3Dees. *Centrum 3D tisku Praha – výhradní dodavatelé 3D tiskáren HP | 3Dees* [online]. Dostupné z: <https://www.3dees.cz/3d-tisk-v-praxi/318-3d-tiskarna-hp-rozsiruje-nove-moznosti-vyroby-ortetickych-pomucek>
- [73] Piro – Your Partner For Every Step. *Piro – Your Partner For Every Step* [online]. Dostupné z: <https://www.piroafo.com/>
- [74] KOČOVÁ, Helena. *Spinální svalová atrofie v souvislostech*. Praha: Grada Publishing, 2017. ISBN 978-80-271-9639-5.
- [75] Dětská mozková obrna – příčiny, příznaky a léčba. *Zdravotnictví a medicína - Zdraví.Euro.cz* [online]. Copyright © 2020 Zdraví.Euro.cz [cit. 02.05.2020]. Dostupné z: <https://zdravi.euro.cz/leky/detska-mozkova-obrna-priznaky-lecba/?fbclid=IwAR2dVAOoPL0ZMPK-KKM-SIBwR1UnuiQoRjLw73YVYKPgwJv4FcGtGdUZcg0>